



Universidad
Carlos III de Madrid

Sistema Gráfico para determinar Coberturas en Redes VSAT.

Trabajo Fin de Grado.

Alumno: Javier Hernández Álvarez.

Tutor: Dr. Víctor Pedro Gil Jiménez.

Titulación: Grado en Ingeniería en Tecnologías de
Telecomunicación.

Fecha: 19/09/2014 – 24/09/2014

Índice de contenidos.

Resumen.	i
Abstract.	ii
Extended abstract.	iii
1. Introducción.	1
1.1 Motivación.	1
1.2 Objetivos.	1
1.3 Estructura de la memoria.	2
1.4 Planificación.	3
1.5 Marco regulador.	5
2. Estado del arte.	10
3. Comunicaciones vía satélite.	16
3.1 Introducción.	16
3.2 Definición, características, servicios.	18
3.2.1 Composición: segmento espacial y segmento terreno.	21
3.2.2 Claves de un sistema de comunicación por satélite.	27
3.3 Órbitas. Definición y clasificación.	28
3.3.1 Definición.	28
3.3.2. Clasificación.	29
3.3.3 Órbita GEO / Órbita LEO.	30
3.4 Análisis del movimiento orbital.	31
3.4.1 Teoría de Newton.	32
3.4.2 Teoría relativista de Einstein.	35
3.4.3 Leyes de Kepler. Enunciado y demostración.	38
3.5 Cobertura.	40
3.6 Acceso múltiple.	43
3.6.1 FDMA. Acceso múltiple por división de frecuencia.	43
3.6.2 TDMA. Acceso múltiple por división en el tiempo.	43
3.6.3 CDMA. Acceso múltiple por división de código.	44
3.6.4 Comparación.	44
3.7 Multiplexación.	45
3.7.1 TDM. Multiplexación por división en el tiempo.	45
3.7.2 FDM. Multiplexación por división en frecuencia.	46
3.8 Sistemas VSAT.	46
3.8.1 Introducción: definición y características.	46
3.8.2 Composición: Segmento espacial y segmento terreno.	47
3.8.3 Aplicaciones y servicios VSAT.	52
3.8.4 Consideraciones económicas.	55

3.8.5 Consideraciones sociales.....	56
3.8.6 Aspectos regulatorios para sistemas VSAT.....	56
3.8.7 Historia y evolución de los sistemas VSAT.....	59
3.9 Formulación para el cálculo del balance de enlace en un sistema VSAT.....	63
4. Descripción de la aplicación.....	71
4.1 Estructura y funcionalidades.....	71
4.2 Dificultades.....	78
4.3 Alternativas de diseño.....	79
4.4 Futuras mejoras.....	80
5. Resultados y validación.....	82
5.1 Caso de estudio número uno.....	82
5.2 Caso de estudio número dos.....	85
5.3 Comparación con otras herramientas.....	86
6. Conclusiones.....	94
6.1 Presupuesto.....	95
Anexos.....	96
Anexo 1: Guía detallada de instalación y uso de la herramienta.....	96
Anexo 2: Comparación herramientas.....	116
Anexo 3: Solución de Sundman al problema de los tres cuerpos.....	117
Anexo 4: Solución de Schwarzschild.....	117
Anexo 5: Antena de Cassegrain.....	117
Anexo 6: Antena gregoriana.....	118
Anexo 7: Función Q.....	119
Anexo 8: Modelo de pérdidas de Friis.....	120
Anexo 9: Función elíptica de Jacobi.....	121

Índice de tablas

Table 1: TFG's schedule.....	iv
Tabla 2: Planificación.....	3
Tabla 3: Planificación con tareas críticas.....	4
Tabla 4: Software de tracking y seguimiento de satélites.....	12
Tabla 5: Bandas de frecuencia satelitales.	21
Tabla 6: Comparación satélite GEO/satélite LEO.	31
Tabla 7: Comparación técnicas acceso múltiple.	44
Tabla 8: Comparación herramientas (I).....	89
Tabla 9: Comparación herramientas (II).....	91
Tabla 10: Presupuesto.....	95
Tabla 11: Comparación herramientas Estado del arte.....	116
Tabla 12: Valores función Q.	120

Índice de figuras.

Image 1: Gantt's diagram.....	iv
Image 2: Outbound link.....	vi
Image 3: Inbound link.....	vi
Image 4: Straight trajectory of VSAT terminal.	xi
Image 5: Results of C/N0 outbound of the points in Image 4.....	xii
Image 6: Screen to manually enter points	xiii
Imagen 7: Diagrama de Gantt	4
Imagen 8: Esquema de una red VSAT.	18
Imagen 9: Constitución de un satélite	21
Imagen 10: Transpondedor regenerativo.	25
Imagen 11: Diagrama de bloques de un receptor superheterodino.	26
Imagen 12: Interferencia solar	28
Imagen 13: Órbitas.	30
Imagen 14: Sistema de referencia en el plano orbital.	39
Imagen 15: Cobertura geométrica de un satélite.	40
Imagen 16: Ángulo de elevación y ángulo de azimut.....	42
Imagen 17: Multiplexación.....	45
Imagen 18: Multiplexación por división en el tiempo, TDM.	45
Imagen 19: Multiplexación por división en frecuencia, FDM.....	46
Imagen 20: Enlace <i>outbound</i>	64
Imagen 21: Enlace <i>inbound</i>	64
Imagen 22: Integración de los módulos de la aplicación.	74
Imagen 23: Interacción y dependencia entre módulos.	74
Imagen 24: Interacción y dependencia entre módulos (II).	75
Imagen 25: Diagrama de flujo herramienta.	76
Imagen 26: Representación movimiento.	77
Imagen 27: Cálculos <i>outbound</i> en función de la posición.....	78
Imagen 28: Resultados <i>outbound</i> con la herramienta del TFG.	84
Imagen 29: Resultados <i>inbound con la herramienta del TFG</i>	84
Imagen 30: Resultados <i>outbound</i> caso de estudio número dos.	86
Imagen 31: Resultado BER caso estudio número dos.....	86
Imagen 32: Datos herramienta 1.	87
Imagen 33: Resultado balance enlace herramienta 1.....	87
Imagen 34: Resultado caso de estudio 1 utilizando herramienta 1.....	88
Imagen 35: Herramienta Satcoms UK.	89
Imagen 36: Herramienta Satcoms UK.	89
Imagen 37: Resultados caso de estudio uno utilizando herramienta Satcoms UK (I).	90
Imagen 38: Resultados caso de estudio uno utilizando herramienta Satcoms UK (II).	90
Imagen 39: Resultados caso de estudio uno utilizando herramienta Satcoms UK (III).	90
Imagen 40: Cálculo <i>outbound</i> caso estudio 1.	91
Imagen 41: Cálculo <i>outbound</i> caso de estudio 1.	92
Imagen 42: Configuración workspace MATLAB.....	96

Imagen 43: Lanzamiento aplicación.....	96
Imagen 44: Pantalla principal aplicación.....	97
Imagen 45: Cuadro de diálogo salida.	97
Imagen 46: Nuevo sistema.....	98
Imagen 47: Carga sistema.	99
Imagen 48: Como introducir datos.	99
Imagen 49: Datos HUB.....	100
Imagen 50: Datos satélite.....	101
Imagen 51: Datos terminal VSAT.....	102
Imagen 52: Mensaje de error.....	102
Imagen 53: Ejemplo datos VSAT.....	103
Imagen 54: Guardado fichero.	104
Imagen 55: Cuadro diálogo fichero guardado.....	104
Imagen 56: Datos guardados.	104
Imagen 57: Cargar datos.	105
Imagen 58: Introducción frecuencias.....	105
Imagen 59: Introducción frecuencias.....	106
Imagen 60: Opciones del usuario.....	107
Imagen 61: Error por falta de datos.	107
Imagen 62: Resultados <i>outbound</i>	108
Imagen 63: Resultados <i>inbound</i>	108
Imagen 64: Movimiento VSAT.....	109
Imagen 65: Representación movimiento.....	110
Imagen 66: Cálculos para el <i>outbound</i> en función de la posición.....	111
Imagen 67: Cálculos para el <i>inbound</i> en función de la posición.	111
Imagen 68: Introducción puntos manualmente.	113
Imagen 69: Representación puntos introducidos manualmente.	114
Imagen 70: Cálculos para el <i>outbound</i> en función de la posición.....	115
Imagen 71: Cálculos para el <i>inbound</i> en función de la posición.	115
Imagen 72: Antena Cassegrain.....	118
Imagen 73: Antena gregoriana.....	119

Glosario de términos

AOCS: *Attitude and Orbital Control System* –Subsistema de control orbital y de posición–

BER: *Bit Error Rate* –Probabilidad de error de bit–

BPSK: *Binary Phase-Shift Keying* –Modulación por desplazamiento de fase binaria–

CDM: *Code Division Multiplexing* –Multiplexación por división de código–

CDMA: *Code Division Multiple Access* –Acceso múltiple por división de código–

CMOS: *Complementary Metal Oxide Semiconductor* –Semiconductor complementario de óxido metálico–

EIRP: *Equivalent Isotropically Radiated Power* –Potencia isotrópica equivalente radiada–

FET: *Field Effect Transistor* –Transistor de efecto de campo–

FDM: *Frequency Division Multiplexing* –Multiplexación por división de frecuencia–

FDMA: *Frequency Division Multiple Access* –Acceso múltiple por división de frecuencia–

FM: *Frequency Modulation* –Modulación de frecuencia–

FI: Frecuencia Intermedia.

GEO: *Geosynchronous equatorial orbit* –Órbita geosíncrona en el plano ecuatorial–

HEO: *High Earth Orbit* –Órbita terrestre alta–

IBO: *Input Backoff* –Backoff de entrada–

ITU-R: *International Telecommunications Union Radiocommunication Sector* –Unión Internacional de Telecomunicaciones, sector de Radiocomunicación–

ITU-T: *International Telecommunications Union Telecommunication Standardization Sector* –Unión Internacional de Telecomunicaciones, sector de estandarización de telecomunicaciones–

LEO: *Low Earth Orbit* –Órbita terrestre baja–

LNA: *Low Noise Adapter* –Adaptador de bajo ruido–

MEO: *Medium Earth Orbit* –Órbita terrestre media–

MMIC: *Monolithic Microwave Integrated Circuits* –Circuitos Integrados de microondas–

OBO: *Output Backoff* –Backoff de salida–

PIRE: Potencia Isotrópica Radiada Equivalente.

QAM: *Quadrature Amplitude Modulation* –Modulación de amplitud en cuadratura–

QPSK: *Quadrature Phase-Shift Keying* –Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura–

RF: *RadioFrequency* –Radiofrecuencia–

SSP: Amplificador de estado sólido.

TDM: *Time Division Multiplexing* –Multiplexación por división en el tiempo–

TDMA: *Time Division Multiple Access* –Acceso multiple por división en el tiempo–

TT&C: *Telemetry, Tracking and Command subsystem* –Subsistema de telemetría, seguimiento y telecomando–

TWT: *Travelling wave tube* –Tubo de onda progresiva–

VSAT: *Very Small Aperture Terminal* –Terminal de apertura muy pequeña–

USAT: *Ultra Small Aperture Terminal* –Terminal de muy pequeña apertura–

Resumen.

El presente documento resume el estudio realizado sobre comunicaciones vía satélite, en concreto, sobre redes VSAT (*Very Small Aperture Terminals*), y presenta como solución una aplicación gráfica desarrollada en MATLAB que permite estudiar las calidades de los enlaces y las coberturas en función de la posición de la estación VSAT. El objetivo principal del proyecto es facilitar y mejorar la docencia en temas de satélites.

La herramienta que se va a desarrollar consiste en una aplicación interactiva, y se pueden diferenciar dos partes. Por un lado, permite al usuario realizar los cálculos del balance de enlace para el enlace *inbound* y enlace *outbound* de una red VSAT –previamente habiendo introducido una serie de datos–. Asimismo permite calcular la probabilidad de error de bit (BER), que es el parámetro que determina la calidad del enlace.

Por otro lado, se ha desarrollado una parte gráfica, en la que se representa el movimiento de un terminal VSAT, manteniéndose fijo el satélite. Dicho movimiento puede ser representado de dos maneras:

- Introduciendo una posición inicial y una posición final –de tal forma que la trayectoria llevada por el terminal es una línea recta–. De esta forma se podrá indicar la resolución de puntos, para que no solamente se realicen los cálculos en las posiciones inicial y final, sino que también se realicen en los n puntos intermedios indicados.
- Introduciendo una serie de posiciones de forma manual.

La aplicación permite representar en el mapa los puntos introducidos de las dos formas anteriores y realizar los cálculos del balance de enlace en cada caso. Como el terminal cambia de posición, la calidad del enlace variará en función de esta. Por último representará los valores obtenidos, para poder observar como varía la calidad del enlace en función de la posición del terminal.

Para corroborar la veracidad de los resultados mostrados por la aplicación, se estudiarán casos reales y se comprobarán los resultados.

Abstract.

The current document summarizes the study about satellite communications, particularly, about VSAT (Very Small Aperture Terminals) terminals, and introduces as a solution a graph application developed in MATLAB. This application allows you to study the bond's quality and the coverage based on the terminal VSAT's position. The main objective of the project is to facilitate and improve teaching in satellite areas.

The application developed is an interactive application, and we can distinguish two parts. The first part allows the user to calculate the link budget for the inbound and outbound link of a VSAT network. It also calculates the bit error rate (BER), which is the parameter that determines the quality of the link

The second part consists in a graphic part, in which the movement of a VSAT terminal is represented. This movement can be represented in two different ways:

- Introducing an initial position and a final position –so that the trajectory of the VSAT terminal is a straight line–. The user also can introduce a resolution of points. If the resolution of points isn't introduced, the application only will perform the calculations for the initial and final point. Instead, if the resolution is introduced, the application will perform the calculations for the initial and final point and for all the n points of the resolution.
- Introducing several points manually.

The application also represents the points introduced in a map and performs the link budget calculations for inbound and outbound links. As the terminal changes position, link quality will vary depending on this. Finally, the application will calculate the azimuth and elevation angles, and will represent the values obtained in order to observe how the quality varies depending on the position of the terminal.

To corroborate the accuracy of the results, real cases will be studied and compared with the application's results.

Extended abstract.

The current document summarizes the study about satellite communications, particularly, about VSAT terminals, and introduces as a solution a graph application developed in MATLAB. This application allows you to study the bond's quality and the coverage based on the terminal VSAT's position. The main objective is to facilitate and improve teaching in satellite areas.

Why should we study VSAT systems?

The answer to that question is because VSAT systems are one of the most communication's systems used. Because of that, is useful having tools that allow us to study these systems.

The main motivation of this tool is its educational use. In our university, Universidad Carlos III de Madrid, we don't have any tool that allows us to study the quality of a communication's link. Plus, we can't see the graphic representation of the system.

Humans make mistakes, and if they study the systems, they will have less accuracy than an application and then, the conclusions will be wrong.

The development of the tool will help the students to solve problems and exercises. Also, the tool will help professors and researchers, so they won't have to use private tools.

With this study, we want to be able to analyze every VSAT system and every problem involving them.

With this job we have four objectives, which are

- a) Get a common formulation for every VSAT system, allowing us to study and perform the calculations of the systems.
- b) Develop an application that calculates all the parameters needed to study a VSAT system.
- c) The tool developed here has an educational purpose, so one of the objectives is that the tool is as graphic and as intuitive as possible, to facilitate users' use.
- d) Represent the movement of a VSAT terminal automatic and manually and study the quality of the system depending on the position. It also aims to show graphically how the link quality varies depending on the position.

The schedule followed for this work is

JOB	START	DURATION (days)
TFG proposal	0	2
Sending documentation	2	1
TFG confirmation	3	1
Information research	4	15
Application development	19	60
Memory writing	79	45
Memory revision	124	15
Presentation preparation	139	7
Memory delivery	146	1
TFG exposure	147	1

Table 1: TFG's schedule.

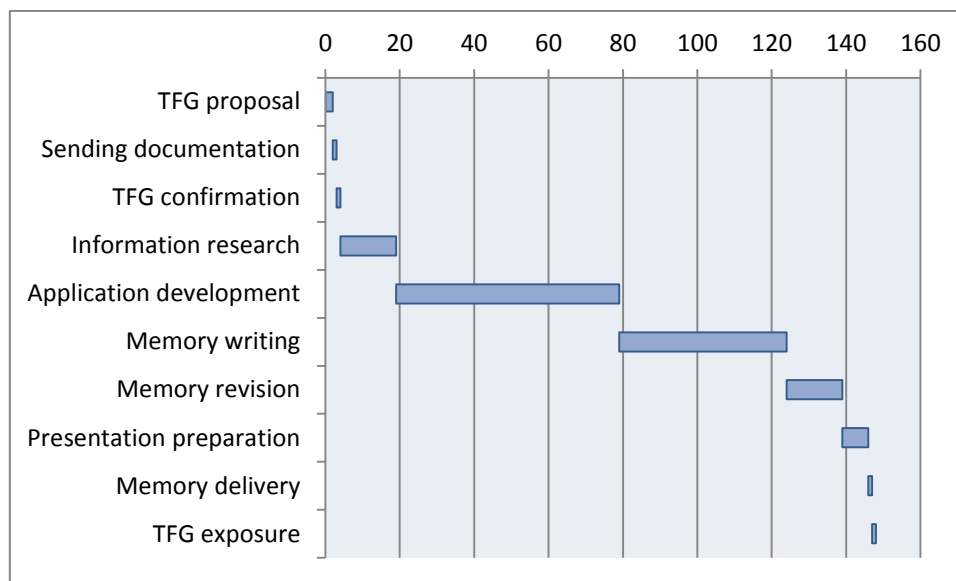


Image 1: Gantt's diagram.

If we consider that there are two critical jobs, which are “Application development” and “Memory writing” we’ll need to add some extra time for these jobs. Fifteen days are going to be added, so, finally, the total duration of the project is 178 days (It is possible to see it in “Planificación.”)

This document has a structure of six chapters.

The first of them is the introduction of the memory. In this chapter are exposed the motivations, objectives, schedule and the regulation of satellite communications.

In the next chapter, similar tools are exposed. There are many tools like the one developed in this job. In the chapter, it is possible to see a table that includes all of them, and shows a short explanation of how they work. Also, it is possible to see the differences between each tool and the application developed here. Later, some of those tools will be tried and will be compared with the one developed in the job.

The third chapter contains the entire theory basis for satellite communications. First, the definition of a satellite communications system is showed. After that, the elements of the system (space segment and terrestrial segment) are explained. Also, there is a list of the keys of a VSAT system. These keys are:

- Orbits.
- Coverage.
- Connectivity.
- Multiple access.
- Bandwidth and frequency spectrum.
- Power.
- Eclipse.

After, all of these elements are explained with details.

As one of the most communication's systems used are VSAT systems, and the case of this job includes a VSAT system, it is necessary to explain everything about this kind of system.

Particularly, a VSAT system is a satellite communication system that includes a VSAT terminal. And what does VSAT mean? The term VSAT means Very Small Aperture Terminals. The main difference between this kind of systems and other ones is that VSAT terminals doesn't radiate directly to another reception stations. Because of that, the communication has to be in an indirect way, using geostationary satellites.

The main advantages that VSAT systems offer are:

- Easier access than other systems.
- Great quality.
- Easy installation and net growing.
- Easy adaptation to every kind of traffic.
- The most important aspect, the economic one. VSAT systems are cheaper than the other kind of systems.

The VSAT systems operate with HUB stations, and together they are able to provide a wide range of telecommunication services.

To be able to develop the VSAT application, we need to get a mathematical formulation, which is common for all the VSAT systems.

In order to get the common formulation, we must take into account that a VSAT system has two different links, inbound and outbound, as we can see in the next pictures.

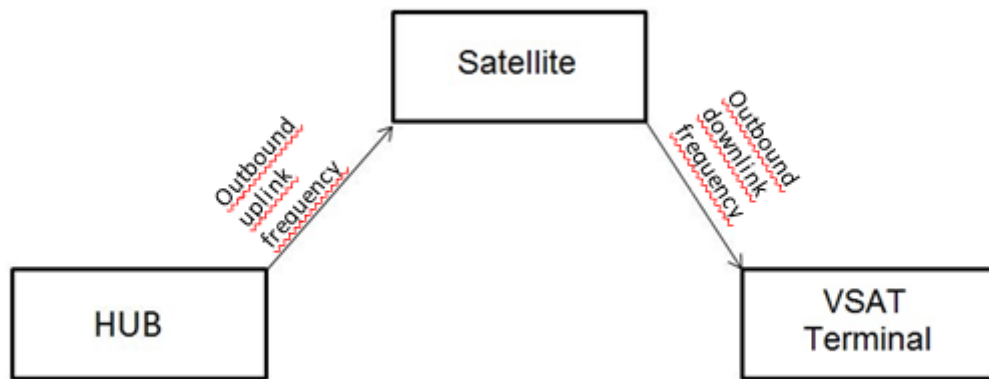


Image 2: Outbound link

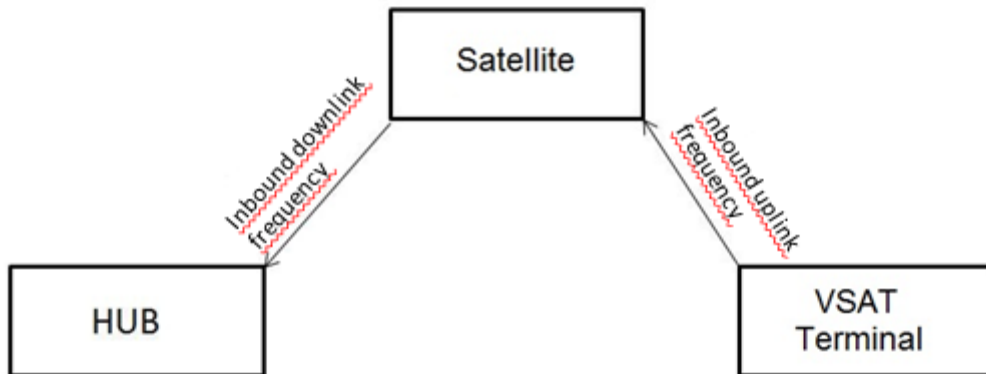


Image 3: Inbound link

Once we have already differentiated these two links, we also have to differentiate the uplink and downlink. For every link (inbound and outbound), there are an uplink and a downlink, so finally we have to get four different formulations:

- Outbound uplink
- Outbound downlink
- Inbound uplink
- Inbound downlink

The way to study each link is with the carrier to noise ratio, energy per bit to noise ratio and bit error rate.

How can we calculate these parameters? We can do it as follows:

a) **Outbound uplink:**

$$\frac{C}{N_{O\uparrow}} = EIRP_{Hub} + \frac{G}{T_{satellite}} - L_{O\uparrow} - IBO_{sat} - 10 \log KB \quad (1)$$

or

$$\frac{C}{N_{O\uparrow}} = EIRP_{Hub} + \frac{G}{T_{satellite}} - L_{O\uparrow} - IBO_{sat} - 10 \log K \quad (2)$$

b) **Outbound downlink:**

$$\frac{C}{N_{O\downarrow}} = EIRP_{satellite} + \frac{G}{T_{VSAT}} - L_{O\downarrow} - OBO_{sat} - 10 \log KB \quad (3)$$

or

$$\frac{C}{N_{O\downarrow}} = EIRP_{satellite} + \frac{G}{T_{VSAT}} - L_{O\downarrow} - OBO_{sat} - 10 \log K \quad (4)$$

c) **Inbound downlink:**

$$\frac{C}{N_{I\downarrow}} = EIRP_{sat} + \frac{G}{T_{Hub}} - L_{I\downarrow} - OBO_{sat} - 10 \log KB \quad (5)$$

or

$$\frac{C}{N_{I\downarrow}} = EIRP_{sat} + \frac{G}{T_{Hub}} - L_{I\downarrow} - OBO_{sat} - 10 \log K \quad (6)$$

d) **Inbound uplink:**

$$\frac{C}{N_{I\uparrow}} = EIRP_{VSAT} + \frac{G}{T_{sat}} - L_{I\uparrow} - IBO_{sat} - 10 \log KB \quad (7)$$

or

$$\frac{C}{N_{I\uparrow}} = EIRP_{VSAT} + \frac{G}{T_{sat}} - L_{I\uparrow} - IBO_{sat} - 10 \log K \quad (8)$$

In the previous equations, the units of $\frac{c}{N}$ are dB, the units of $\frac{c}{N_0}$ are dB/Hz, the units of EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power) are dBW, the units of G/T are dB/K, the units of L, IBO, OBO and 10logKB are dB, and the units of 10logK are dB.

Once we have calculated the carrier to noise ratio for each link, we can calculate the general carrier to noise ratio for each link. The way to do that is:

a) Outbound link

$$\left(\frac{c}{n_0}\right)_{OT}^{-1} = \left(\frac{c}{n_0}\right)_{O\uparrow}^{-1} + \left(\frac{c}{n_0}\right)_{O\downarrow}^{-1} \quad (9)$$

b) Inbound link

$$\left(\frac{c}{n_0}\right)_{IT}^{-1} = \left(\frac{c}{n_0}\right)_{I\uparrow}^{-1} + \left(\frac{c}{n_0}\right)_{I\downarrow}^{-1} \quad (10)$$

Equations nine and ten are expressed in natural units.

After that, we can calculate the energy per bit to noise ratio, a parameter we need to calculate the bit error rate.

We can calculate the energy per bit to noise ratio using the next formula

$$\frac{e_b}{n_0} = \frac{c}{n_0} \cdot \frac{1}{R_b} \quad (11)$$

$\frac{c}{n_0}$ is expressed in natural units and R_b units are bits per second.

Finally, we can calculate the bit error rate (BER), which is the parameter with you can study the quality of the link.

This parameter depends on the modulation used. With this term, we mean the techniques that are used to carry information on a carrier wave. With these techniques is possible to transmit more information and is possible to achieve more resistance to noise and interference.

There are a lot of different modulations, depending on the parameter on which it acts. The most commonly used in these cases are:

- a) BPSK:** Binary Phase-Shift Keying is the simplest form of phase shift keying (PSK). It uses two phases which are separated by 180° and so can also be termed 2-PSK. This modulation is the most robust of all the PSKs. It is, however, only able to modulate at one bit per symbol and so is unsuitable for high data-rate applications. If this modulation is used, the way to calculate the bit error rate is the next

$$BER = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (12)$$

- b) QPSK:** Quadrature Phase-Shift Keying. This modulation uses four points on the constellation diagram, so they are equispaced around a circle. With four phases, QPSK can encode two bits per symbol.

If this modulation is used, the way to calculate the bit error rate is the next

$$BER = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (13)$$

- c) M-QAM:** Quadrature Amplitude Modulation. The two carrier waves, usually sinusoids, are out of phase with each other by 90° and are thus called quadrature carriers or quadrature components. The modulated waves are summed, and the resulting waveform is a combination of both phase-shift keying (PSK) and amplitude-shift keying (ASK).

If this modulation is used, the way to calculate the bit error rate is the next

$$BER = 2\left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) \cdot Q\left(\sqrt{\frac{3}{M-1} \frac{\log_2 M E_b}{\eta}}\right) \quad (14)$$

With this parameter, we can study the quality of each link, and decide if the link is good or bad. Depending on whether the parameter value is greater or lower than a certain threshold value, the link is considered to have a satisfactory quality or then the satellite link is bad

Once we have got this formulation, we will use it to develop the mentioned tool. The chapter number four contains a long description of the tool.

The application developed in this project allows the user to study the link budget for any VSAT system. It is interesting to do a study of the quality of a VSAT system because there are few tools that are able to do this in a comprehensive way.

There are two situations that are interesting to study.

The first situation mentioned refers to a conventional VSAT system. That is, a system in which there is a HUB fixed at a certain position, a fixed geostationary satellite and a fixed VSAT terminal.

The second situation relates to a moving system. In this new situation, we have a different VSAT system. In this new case, we have a fixed HUB and a fixed satellite. The big difference is in the VSAT terminal, which will be in constant motion.

It is interesting to introduce this difference because with it, we can study the variation of the different parameters of the system depending on the position of the VSAT terminal. This

allows the user to estimate and obtain conclusions on which areas is better to make a future installation of a VSAT system.

In both situations a series of calculations that allows us to study the link quality are made. In the first situation the calculations of the carrier to noise ratio for inbound and outbound link are made. Also, if it's possible, the calculations of the energy per bit to noise ratio and bit error rate are made. All of these calculations need different data.

The list of data that can be introduced by the user is:

- Transmission power.
- Transmission gain.
- IERP.
- Reception gain.
- Antenna temperature.
- Antenna diameter.
- Antenna radiation efficiency.
- Transmission loss –because of bad quality terminals–.
- Reception loss –because of bad quality terminals–.
- Input backoff, just in the satellite.
- Output backoff, just in the satellite.
- Frequencies.
- Bandwidth used by the satellite transponder.
- Bandwidth used by the hub.
- Bandwidth used by the VSAT terminal.
- Number of VSAT terminals.
- VSAT, satellite and HUB's latitude.
- VSAT, satellite and hub's longitude.

Also, there are data that belong to each link, instead of the terminals. These data are:

- Transmission rate.
- Modulation or codification used.
- Spectral efficiency.

The user can choose if he wants to get the calculations of the outbound link, of the inbound link or of the bit error rate. When the user has chosen, a new window is opened and shows the results of the calculations.

In the second situation the same calculations are made, and additionally the calculation of the azimuth and elevation angles are made. These two parameters allow the user to get the system coverage. All the calculations depend on the position of the terminal.

There are two different ways to define the trajectory of the VSAT terminal. The first one is just introducing the initial point (initial latitude and initial longitude) and the final point (final latitude and final longitude). When the user chooses this option, he also has to introduce a point resolution; this means the number of points in which the trajectory will be divided.

In this first option, the trajectory of the VSAT terminal will be a straight line. The initial and final point will be the indicated, and the line will be divided in the number of points that indicates the resolution data. The higher resolution introduced the better, because with more points the calculations will be much more accurate.

After the initial and final point and the point resolution are introduced, the application will draw a map in which the user can see every point, as we can see in the next picture.

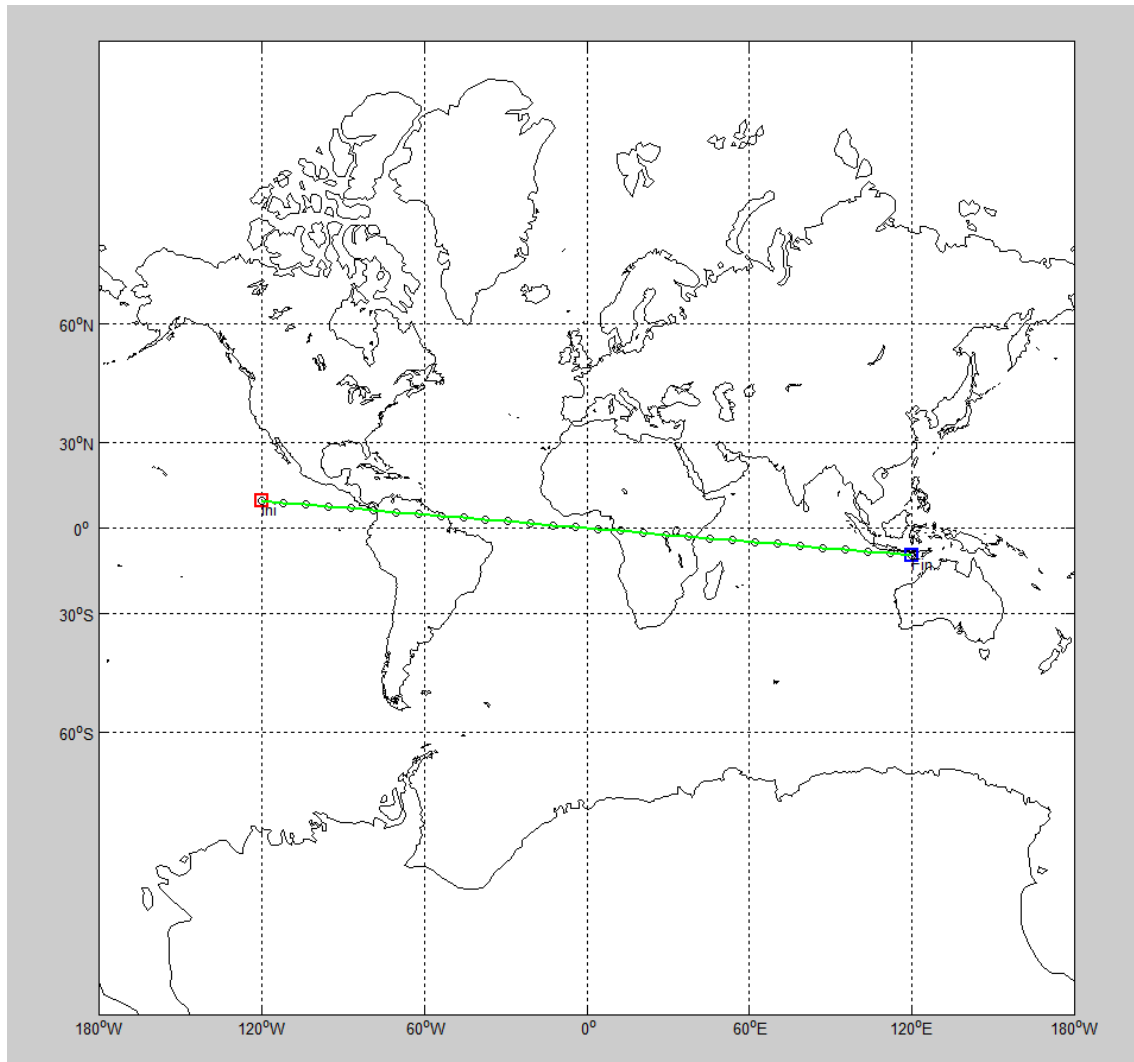


Image 4: Straight trajectory of VSAT terminal.

In that image, the red square indicates the starting point and the blue square indicates the final point. Plus, there is a green line that connects the starting and final point. Over the green line, there are little black circles. In total, there are thirty points, which is the resolution that the user entered.

Also, the application performs the calculation for every point. In each point, the application calculates the carrier to noise relation for inbound and outbound links, also the application calculates the azimuth and elevation angles. If it is possible to calculate the bit error rate, the application will calculate it, because it is the parameter that allows the user to study the

quality of the link. The azimuth and elevation angles allow the user to know the coverage of the system.

Once the calculations are done, the application will show a new window and it will plot the evolution of the carrier to noise relation for inbound and outbound link depending on the latitude, longitude and the point resolution; and the evolution of the azimuth and elevation angles depending on the latitude, longitude and the point resolution.

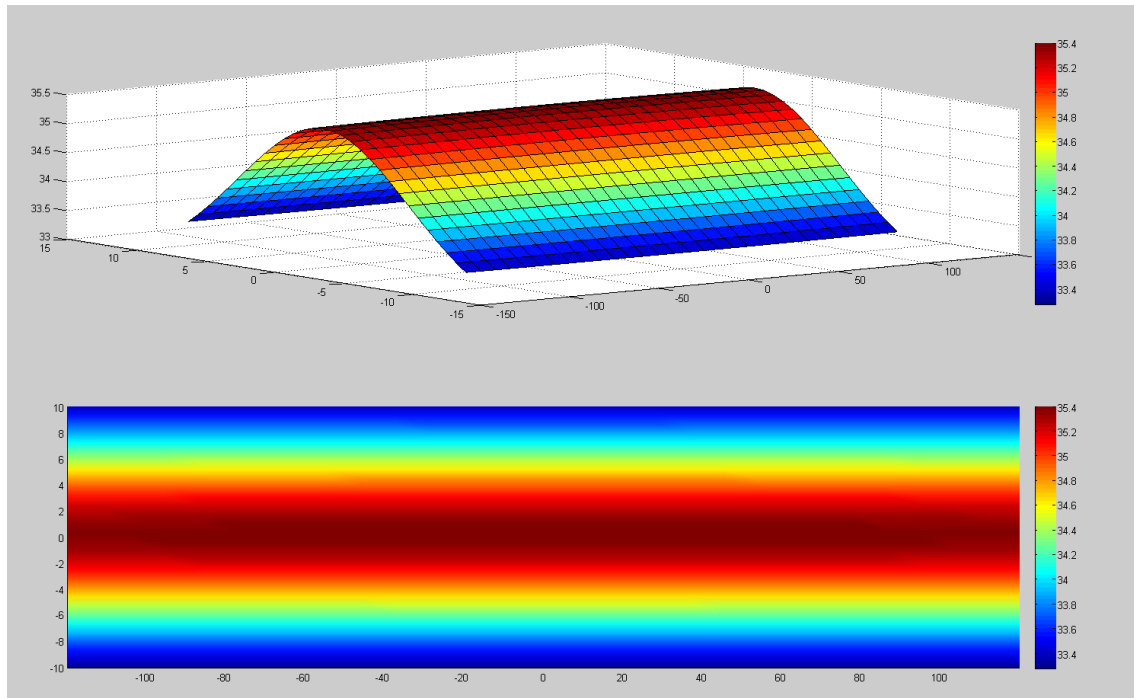


Image 5: Results of C/N0 outbound of the points in Image 4.

As we can see in the image, the x-axis represents the entered longitudes and the y-axis represents the latitudes.

There is another option to define the VSAT terminal's movement. In this new option, the user can introduce the points manually. When the user chooses this option, a new window is opened.

In that window, the user can introduce up to thirty-five latitudes and thirty-five longitudes.

The other goal set is to get the application to be as modular as possible. With a modular design more flexibility is achieved. Also, the performance and productivity of the application are better, as well as handling and error correction.

The application has been developed in a modular way. There are various modules that are part of the application, and each module performs a different function. The modules in which the application is divided are:

- Files saving.
- Files loading.
- Data input.
- Calculations.
- Movement representation.

Inside of each module, there are more modules so the way of performing the calculations is as simple as possible.

The main modules are the module of data input, the module of the calculations and the movement representation module. The calculations module performs the calculations of the outbound, of the inbound and of the bit error rate.

The movement representation module allows the application to represent the different positions of the VSAT terminal. It also, calls the corresponding calculations modules to study the evolution of the calculations depending on the position.

To perform the calculations and to represent the movement, it is necessary to have a series of data, and for this different modules are created: data input, saving and loading files.

All modules described above are fully integrated into the application and cohesive together. It is possible to see some block diagram of the integration and interaction of each module in the chapter *“Descripción de la aplicación.”*

This chapter also contains the difficulties encountered during the project and future functionalities that can be added to the application.

The chapter number five contains several examples of solved exercises manually and solved using the tool developed in this job. This is done in order to corroborate the accuracy and good performance of the developed tool. The way of performing the calculations has been formulated and can be found before.

First, the exercises related to VSAT systems solved during 2013-2014 course of the subject *“Sistemas de Telecomunicación”* will be used as examples. Later, exam exercises related to VSAT systems will be used as examples, and finally other tools will be used to solve these exercises and the results will be compared.

The last chapter contains the conclusions of the job. The conclusions are that all the objectives have been achieved, because

1. A common formulation for every VSAT system has been achieved.

2. The application calculates all the parameters needed to study the quality of the system.
3. The application correctly simulates the movement of the VSAT terminal, when the user introduces the points manually and when he does it automatically.
4. The application has an easy use because there are a lot of windows and messages that inform the user of the situation of the application. Also, there are buttons that make that the handling of the application is simple.

1. Introducción.

1.1 Motivación.

Los sistemas VSAT representan una de las tipologías de comunicación más empleadas actualmente, por lo que disponer de una herramienta gráfica que facilite su estudio resulta de especial interés o conveniencia.

La principal motivación de esta herramienta es su uso a nivel docente. Actualmente el departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la universidad no dispone de herramientas de este tipo que permitan tanto a investigadores como a alumnos realizar los procesos más habituales para este tipo de sistemas, como el cálculo de balances de enlace o representaciones gráficas.

La falta de una herramienta de estas características obliga a realizar el estudio de sistemas VSAT de forma manual, aplicando simplificaciones de cálculo para facilitar su manejo. Este proceso manual disminuye la precisión de los cálculos y aumenta el riesgo de error por fallo humano, obteniéndose en muchos casos conclusiones erróneas.

El disponer de una herramienta de este tipo facilitará a los estudiantes el estudio y la resolución y corrección de ejercicios. También facilitará la labor a profesores e investigadores, al no tener que utilizar otras herramientas de pago o privadas para realizar los cálculos.

Por último, la herramienta que aquí se presenta es flexible y modular, de tal forma que puede ser aumentada en siguientes versiones para introducir aspectos correctivos o evolutivos. También se presenta como una herramienta de código abierto, disponible de forma gratuita para todos los usuarios y modificable por todos los usuarios.

Por otro lado, la realización de este trabajo sobre terminales VSAT va a ser muy beneficiosa para mí, ya que al finalizarla seré capaz de realizar cualquier problema de comunicaciones vía satélite. Esto me supondrá unas grandes ventajas en caso de estudiar un máster relacionado con telecomunicaciones. También, el desarrollo de la aplicación gráfica me será muy útil, pues podré afianzar mis conocimientos de programación, lo que sin duda es una gran ventaja y oportunidad para mi carrera profesional.

1.2 Objetivos.

Se pretende realizar un estudio sobre redes VSAT, presentar y utilizar todas las herramientas matemáticas disponibles y necesarias con el objetivo de ser capaces de analizar cualquier problema y cualquier alternativa en la que haya redes VSAT.

El objetivo general de este Trabajo Fin de Grado es desarrollar una herramienta que permita realizar el estudio de cualquier tipo de sistema VSAT. Para ello se utilizarán todas las herramientas matemáticas disponibles de tal forma que se pueda estudiar el sistema en términos de relación portadora a ruido, energía por bit a ruido y probabilidad de error de bit,

parámetros que determinan la calidad del enlace; y determinar de manera gráfica la cobertura del sistema VSAT en función de la posición del terminal.

Los objetivos más particulares de la herramienta son:

- Implementar formulación homogénea para el cálculo de balances de enlace en sistemas VSAT en función de unos parámetros dados.
- Obtener los resultados del balance de enlace y mostrar la calidad del mismo de la manera más gráfica posible.
- Representar el movimiento de un terminal VSAT (de manera automática o manual) y calcular el balance de enlace, la calidad y la cobertura en función de la posición.
- Mostrar gráficamente la evolución de los parámetros del punto anterior en función de la posición.
- Como la finalidad de la herramienta es su uso docente, se espera que la herramienta sea lo más gráfica e intuitiva posible para facilitar el uso a los usuarios.

1.3 Estructura de la memoria.

La memoria estará organizada en seis capítulos, organizados según el siguiente esquema:

- Capítulo 1: Introducción. En este capítulo se puede encontrar la motivación para realizar este Trabajo Fin de Grado, los objetivos que se esperan cumplir con la realización de este Trabajo Fin de Grado, la planificación del trabajo y el marco regulador relativo al tema de satélites.
- Capítulo 2: Estado del arte. En este capítulo se podrá encontrar un listado de herramientas similares a la que se va a desarrollar en el trabajo. También se puede encontrar una comparación de la herramienta que se va a desarrollar con las herramientas que existen actualmente.
- Capítulo 3: Este capítulo contiene toda la base teórica necesaria para estudiar los sistemas de comunicación por satélite. En primer lugar se define que son las comunicaciones vía satélite, se expone la estructura de los sistemas de comunicaciones por satélite y las claves de los sistemas de comunicación por satélite. Posteriormente, se explican de manera más detallada en qué consisten cada una de las claves del sistema.

Como la herramienta que se va a desarrollar realiza el estudio de los sistemas VSAT, es necesario que haya una explicación detallada de lo que es un sistema VSAT. Por ello, en este capítulo número tres también se explica todo lo relacionado con los sistemas VSAT: qué son, cuáles son sus aplicaciones, consideraciones económicas, sociales, de regulación, etcétera.

También, este capítulo contiene la formulación teórica que se ha utilizado para implementar todos los cálculos de la herramienta.

- Capítulo 4: En este capítulo se describe la herramienta desarrollada. En la descripción de la herramienta, se pueden ver las principales funcionalidades y componentes de la misma, así como las dificultades que se han encontrado a la hora del desarrollo y futuras mejoras que se pueden implementar.
- Capítulo 5: En este capítulo se valida la herramienta desarrollada. Para ello, se toman ejercicios de exámenes y ejercicios resueltos y se comparan los resultados obtenidos con los resultados que ofrece la herramienta desarrollada. También, se compara la herramienta desarrollada con alguna de las herramientas mencionadas en el “Estado del arte”, para corroborar la validez de la misma.
- Capítulo 6: Por último, en este capítulo se exponen las conclusiones extraídas con la realización del Trabajo Fin de Grado, en las cuales se puede ver un presupuesto desglosado del mismo.

1.4 Planificación.

La planificación seguida se muestra en la siguiente tabla:

TAREA	INICIO	DURACIÓN (días)
Propuesta de Trabajo Fin de Grado	0	2
Envío de documentación	2	1
Confirmación Trabajo Fin de Grado	3	1
Búsqueda de información	4	15
Desarrollo de la aplicación	19	60
Redacción de la memoria	79	45
Revisión de la memoria	124	15
Preparación de la presentación	139	7
Entrega de la memoria	146	1
Defensa del trabajo	147	1

Tabla 2: Planificación

La duración total del proyecto es de 148 días, es decir, prácticamente cinco meses.

El diagrama de Gantt asociado a dicha tabla:

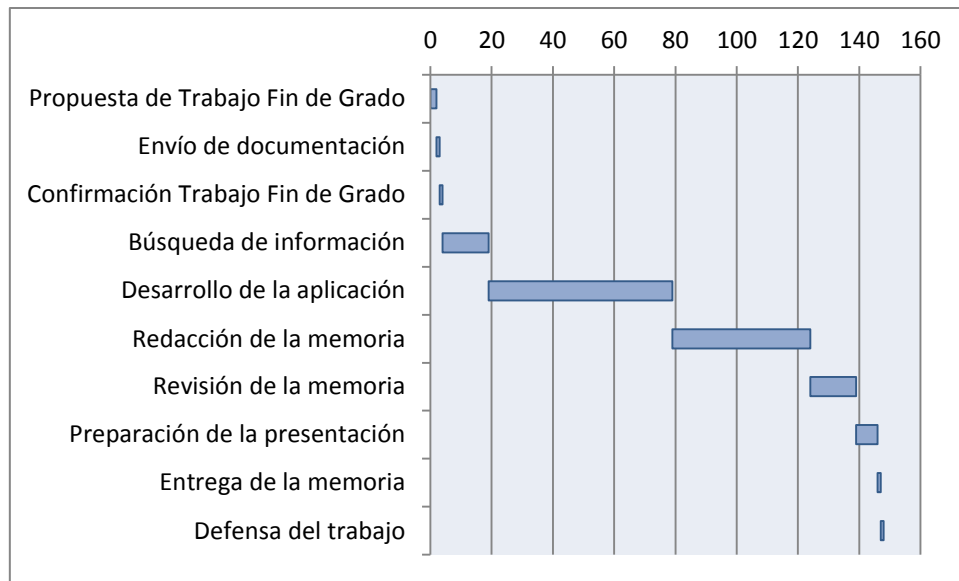


Imagen 7: Diagrama de Gantt

Las tareas críticas son la tarea “Desarrollo de la aplicación” y “Redacción de la memoria”. En la planificación inicial, la duración de estas tareas respectivamente es de 60 días (dos meses) y 45 días.

Como son las tareas más importantes del trabajo, pueden sufrir retraso, por lo que se establecerá una holgura para que, en caso de sufrir retraso, no afecte a la duración total del proyecto. La holgura establecida para estas tareas es de 15 días.

La duración del proyecto teniendo en cuenta estas holguras se puede ver en la siguiente tabla.

TAREA	INICIO	DURACIÓN (días)
Propuesta de Trabajo Fin de Grado	0	2
Envío de documentación	2	1
Confirmación Trabajo Fin de Grado	3	1
Búsqueda de información	4	15
Desarrollo de la aplicación	19	75
Redacción de la memoria	94	60
Revisión de la memoria	154	15
Preparación de la presentación	169	7
Entrega de la memoria	176	1
Defensa del trabajo	177	1

Tabla 3: Planificación con tareas críticas.

En este caso, la duración total del proyecto es de 178 días, es decir, casi 6 meses. El diagrama de Gantt en este caso es análogo al anterior, con la duración incrementada.

1.5 Marco regulador.

El sector de las telecomunicaciones y las tecnologías de la información es un sector ampliamente regulado. El primer convenio data de 1865, año en el cual se creó la Unión Internacional de Telegrafía, la cual tras la fusión con la Unión Internacional de Radio, dio lugar a la Unión Internacional de Comunicaciones (UIT).

Con el gran avance espacial, y especialmente con los satélites de órbita geoestacionaria, se abrieron muchísimas posibilidades para la transmisión de imágenes y sonidos a grandes distancias. Esto lleva asociado un gran progreso en comunicaciones vía satélite y ha repercutido en otras ciencias.

El gran avance experimentado y el gran potencial de las telecomunicaciones han hecho que sea necesaria una regulación del sector. Para ello, la UIT en 1958 inició estudios con el objetivo de asignar las frecuencias para las radiocomunicaciones espaciales, teniendo en cuenta que la asignación de frecuencias para servicios de comunicación de radio no debe ofrecer una prioridad a ningún país o grupo de países, ni debe suponer un obstáculo para que otros países establezcan sistemas espaciales.

Para la reglamentación del uso de la órbita geoestacionaria para radiotelevisión directa se establecieron los acuerdos de la Conferencia de Ginebra de 1977. Gracias a estos acuerdos se establece un plan según el cual se distribuirán a los países frecuencias de bandas de 12 GHz asociadas a puntos de la órbita de los satélites geoestacionarios.

Además de esta regulación técnica, existe otra regulación de las emisiones de los satélites y su uso y disfrute por los Estados y organizaciones internacionales. En esta regulación han intervenido el Subcomité de asuntos jurídicos de la Comisión para la utilización pacífica del espacio exterior de las Naciones Unidas. También han intervenido la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI, en el tema relativo a satélites de ayuda a la navegación aérea), la Organización Consultiva Marítima Internacional (INMARSAT, en el tema relativo a satélites de ayuda a la navegación marítima), la UNESCO (en el tema relativo a programas de enseñanza vía satélite), la Organización Mundial de Protección Intelectual (WIPO, en el tema relativo a la protección de los derechos de autor) y la Asociación Internacional de Derechos para el estudio de problemas jurídicos que planteen el uso y explotación de satélites.

Como resultado del trabajo de todas estas organizaciones, existe una doctrina en forma de principios jurídicos para el uso y explotación de los satélites de comunicaciones, principios que han sido aprobados por la subcomisión de asuntos jurídicos de las Naciones Unidas en 1976.

También es importante destacar los proyectos sobre radiodifusión directa por satélites, presentados en la subcomisión de asuntos jurídicos por Estados Unidos, Argentina, Canadá y Suecia; y el Convenio de Bruselas del 21 de mayo de 1974, referido a la protección de señales transmitidas por satélite. Mediante este convenio se dispone que todos los Estados deben tomar medidas para impedir que, desde o en su territorio, se distribuya cualquier señal portadora de información que haya sido transmitida por un satélite.

Las bases para el uso y explotación de los satélites de comunicaciones son las siguientes:

- La transmisión de imágenes y sonidos a través de satélites artificiales debe realizarse según el Derecho Internacional y el Tratado del 27 de enero de 1967, y en particular debe ajustarse a los Convenios Internacionales de Telecomunicaciones.
- Las comunicaciones por satélites deben ser asequibles para todos los Estados. Con este fin deberá existir un organismo de alcance y competencia mundial del que dependan las organizaciones actualmente existentes. Este organismo regulador será el encargado de dirigir en última instancia y coordinar todas las operaciones espaciales sobre comunicaciones. En los puestos directivos de dicha organización debe haber un sistema de representación de todos los Estados, de forma que, sin perjuicio de reconocer otros derechos preferentes a favor de los países que más hayan contribuido al desarrollo del complejo espacial, queden garantizados los derechos de fiscalización y utilización del satélite por cualquier país, mediante la asistencia técnica y financiera a los menos desarrollados.
- Teniendo en cuenta que la órbita geoestacionaria y el espectro de frecuencias son recursos limitados, se evitará por parte de las actuales potencias espaciales un uso exhaustivo o perjudicial de ellos. Las emisiones espaciales dejarán de transmitirse al terminar sus programas y se suspenderán cuando sea necesario por interferir servicios preferentes como los de ayuda y salvamento de astronautas.
- La utilización de los satélites deberá realizarse siempre con fines pacíficos, procurando atender a la enseñanza y en general a fines humanitarios, especialmente a favor de los países menos desarrollados. Se evitará el control o hegemonía de las transmisiones por parte de cualquier Estado u organismo intergubernamental, y en especial la imposición de ideologías políticas determinadas que infrinjan la moral o las buenas costumbres o atente a la libertad de las conciencias. Las transmisiones de radiotelevisión dirigidas a un Estado extranjero requerirán el consentimiento del mismo, el cual, en caso afirmativo, tendrá derecho a participar en tales actividades.
- Se garantizará la libertad de información, el derecho de comunicación, y en particular, los derechos de autor, artistas, patentes y marcas, concediendo, en su caso, a los afectados el derecho de réplica en los mismos supuestos y condiciones en que se reconoce en los medios ordinarios de comunicación.

También, en España, existe la ley 37/1995 de Telecomunicaciones por Satélite, aprobada para modificar directivas anteriores, relativas a la competencia de los mercados de terminales de telecomunicaciones, a la competencia en los mercados de servicios de telecomunicaciones, a la regulación del marco jurídico propio de los servicios de telecomunicación por satélite y con el objetivo de liberalizar la prestación de los servicios de telecomunicación por satélite.

Esta ley consta de los siguientes artículos –se puede ver en el siguiente enlace https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-1995-26837-:

“Artículo 1: Servicios de comunicación por satélite

1. Los servicios de telecomunicaciones para cuya prestación se utilicen de forma principal redes de satélites de comunicaciones no tendrán la consideración de servicio público.

2. Estos servicios podrán prestarse mediante servicios portadores de telecomunicaciones por satélite o por medio de redes de satélite de titularidad del propio prestador del servicio.

3. A los efectos de esta Ley, se entiende por:

a) «Red de satélite»: la infraestructura compuesta por dos o más estaciones terrenas que funcionen conjuntamente a través de un satélite y que permita la radiocomunicación de dichas estaciones con el segmento espacial (enlace ascendente) y la de éste con aquéllas (enlace descendente).

b) «Estación terrena»: la estación, situada en la superficie de la Tierra o en la parte principal de la atmósfera, destinada a establecer comunicación con una o varias estaciones espaciales; o con una o varias estaciones de la misma naturaleza mediante el empleo de uno o varios satélites reflectores u otros objetos situados en el espacio.

c) «Segmento espacial»: los satélites y las instalaciones y sistemas en tierra que efectúan las funciones de telemida, telemando y seguimiento, y el apoyo logístico para los satélites.

d) «Enlace ascendente»: el enlace radioeléctrico efectuado desde una estación terrena transmisora hasta el receptor de un satélite.

e) «Enlace descendente»: el enlace radioeléctrico efectuado desde el transmisor de un satélite hasta una estación terrena receptora.

f) «Servicio VSAT» (*«Very Small Aperture Terminal»*): aquel servicio que puede proporcionarse con una red constituida por un sistema unidireccional o bidireccional de comunicación de señales que permite que varias estaciones o terminales de velocidad variable con antenas de pequeña apertura (menos de 2,4 metros de diámetro) se comuniquen entre sí, con o sin la mediación de una estación central.”

“Artículo 2: Servicio portador de telecomunicaciones por satélite.

Se entiende por servicio portador de telecomunicaciones por satélite el suministro a terceros del transporte de señales a través de redes de satélite.”

“Artículo 3. Autorización para la prestación de servicios.

1. Las autorizaciones para la prestación de los servicios previstos en los artículos 1 y 2, se otorgarán por el Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, de conformidad con lo dispuesto en el Reglamento técnico y de prestación del servicio, por orden de presentación de las correspondientes solicitudes.

2. Las autorizaciones se entenderán denegadas una vez transcurridos cuatro meses desde la presentación de las solicitudes.

3. En aquellos supuestos en que exista limitación de los recursos disponibles para tal prestación, las autorizaciones se otorgarán por concurso público.

4. No obstante lo dispuesto en los apartados anteriores, reglamentariamente podrá preverse la posibilidad de que, ante una solicitud de autorización, se abra un período de información pública, pudiendo otorgarse la autorización por adjudicación directa en ausencia de otros interesados en la prestación del servicio o, en caso de existir otros interesados, mediante concurso, de acuerdo con criterios de objetividad, transparencia y no discriminación; criterios que serán, en todo caso, aplicables a las condiciones para la prestación de los servicios de telecomunicaciones por satélite.

5. En todo caso, las autorizaciones a que se hace referencia en los apartados anteriores llevarán aparejadas la concesión de dominio público radioeléctrico necesaria para su prestación.”

“Artículo 4. Servicios no incluidos.

Lo dispuesto en la presente Ley no será de aplicación a la prestación de los siguientes servicios, aunque para ello se utilicen en parte redes de telecomunicación por satélite:

- El servicio telefónico básico.
- Los servicios de radiodifusión sonora terrenal.
- Los servicios de difusión de televisión contemplados en las Leyes 4/1980, de 10 de enero, de Estatuto de la Radio y la Televisión; 46/1983, de 26 de diciembre, reguladora del Tercer Canal de Televisión, y 10/1988, de 3 de mayo, de Televisión Privada.
- El servicio portador de los servicios de difusión de televisión mencionados en el guión anterior.

A estos efectos, se entenderá que el servicio portador de esos servicios de difusión de televisión incluye exclusivamente los siguientes aspectos:

- a) La distribución de las señales de los servicios públicos de difusión de televisión desde los centros de continuidad de las entidades gestoras de este servicio público hasta los centros emisores que constituyen la red de difusión primaria.
- b) La emisión de las señales de esos servicios públicos de difusión de televisión, mediante redes de difusión primaria, constituidas por centros emisores, y secundaria, constituidas por centros reemisores, en la correspondiente zona de servicio.”

“Artículo 5. Canon por reserva del dominio público radioeléctrico.

Las entidades autorizadas que utilicen redes propias y los prestadores de servicios portadores de telecomunicaciones por satélite estarán obligados al pago del canon por reserva del dominio público radioeléctrico a que se refiere el artículo 7.3 de la Ley 31/1987, de 18 de diciembre, de Ordenación de las Telecomunicaciones.”

“Artículo 6. Equipos terminales.

Los equipos necesarios para la recepción y el acceso a los servicios de telecomunicación por satélite tendrán la consideración de equipo terminal de telecomunicaciones y les será de aplicación lo dispuesto para estos equipos en la Ley 31/1987, de 18 de diciembre, de Ordenación de las Telecomunicaciones.”

“Artículo 7. Interconexión con redes públicas.

1. Se podrán interconectar las redes de satélite con las redes públicas de telecomunicación o con las redes establecidas en aplicación del artículo 23 de la Ley 31/1987, de 18 de diciembre, de Ordenación de las Telecomunicaciones, para prestar servicios de telecomunicación distintos a los mencionados en el artículo 4 de la presente Ley.

2. No obstante lo dispuesto en el artículo 1.1, los servicios que se presten sobre las redes interconectadas, a que hace referencia el apartado 1 de este artículo, tendrán la consideración de servicios de telecomunicación de valor añadido regulados en la Ley 31/1987, de 18 de diciembre, de Ordenación de las Telecomunicaciones.

3. Las condiciones de interconexión de las redes de satélite con las redes de telecomunicaciones, a que se refiere el apartado 1, se regularán mediante el correspondiente Reglamento técnico y de prestación del servicio.

Esta interconexión sólo podrá denegarse cuando los equipos no cumplan las especificaciones técnicas que les resulten de aplicación.”

La ley anunciada anteriormente estuvo vigente hasta el 1 de mayo de 2010. Posteriormente, se aprobó la Ley 9/2014, del 9 de mayo, de Telecomunicaciones –podemos verla a través de este enlace <http://www.boe.es/boe/dias/2014/05/10/pdfs/BOE-A-2014-4950.pdf>–, que enuncia:

Artículo 60.5: “La utilización de frecuencias radioeléctricas mediante redes de satélites se incluye dentro de la administración del dominio público radioeléctrico. Asimismo, la utilización del dominio público radioeléctrico necesaria para la utilización de los recursos órbita – espectro en el ámbito de la soberanía española y mediante satélites de comunicaciones queda reservada al Estado. Su explotación estará sometida al derecho internacional y se realizará, en la forma que mediante real decreto se determine, mediante su gestión directa por el Estado o mediante concesión. En todo caso, la gestión podrá también llevarse a cabo mediante conciertos con organismos internacionales.”

Artículo 69.7: “Los órganos superiores y directivos del Ministerio de Industria, Energía y Turismo que, de conformidad con la estructura orgánica del departamento, asuman las competencias asignadas a este ministerio, ejercerán las siguientes funciones:

- Ejercer las funciones en materia de administración del dominio público radioeléctrico a las que se refiere el Título V. En particular, ejercerá las siguientes funciones:
 - La gestión de la asignación de los recursos órbita – espectro para comunicaciones por satélite.”

Artículo 70.7: “Las administraciones públicas estarán exentas del pago de esta tasa en los supuestos de reserva de dominio público radioeléctrico para la prestación de servicios obligatorios de interés general que tenga exclusivamente por objeto la defensa nacional, la seguridad pública y las emergencias, así como cualesquiera otros servicios obligatorios de interés general sin contrapartida económica directa o indirecta, como tasas, precios públicos o privados, ni otros ingresos derivados de dicha prestación, tales como los ingresos en concepto de publicidad. A tal efecto, deberán solicitar, fundamentadamente, dicha exención al Ministerio de Industria, Energía y Turismo. Asimismo, no estarán sujetos al pago los enlaces descendentes de radiodifusión por satélite, tanto sonora como de televisión.

2. Estado del arte.

La herramienta que se ha desarrollado consiste en una aplicación gráfica que permite realizar el balance de enlace de cualquier sistema satelital formado por terminales VSAT. La aplicación es interactiva, con lo cual el usuario que la utilice puede introducir todos los datos que desee, en función de los cuales se realizará el cálculo. También, se pueden elegir diversas opciones que influyen en el cálculo.

Asimismo, la aplicación calcula de forma gráfica la cobertura para el terminal VSAT. (La aplicación será explicada más en profundidad en el capítulo “Descripción de la aplicación.”).

Existen otras aplicaciones que realizan cálculo de radioenlaces, entre las que podemos destacar las siguientes:

- **Balance de potencias para GEO:** son unas hojas de cálculo de Excel desarrolladas por la Universidad Politécnica de Valencia. Al ser hojas de cálculo en Excel, se pueden introducir los datos de una manera sencilla, y se obtiene el resultado de forma sencilla. Existen dos hojas de cálculo diferentes. Una de ellas permite realizar el cálculo del balance de enlace para la órbita geoestacionaria, mientras que la otra permite hacerlo para órbitas LEO y MEO.
Cada hoja de cálculo a su vez está dividida en otras hojas de cálculo. Las primeras de ellas permiten introducir los datos y observar resultados parciales, mientras que la última de ellas tiene el resultado total del balance de enlace.
Estas herramientas se pueden obtener de manera gratuita a través del siguiente enlace:
http://www.upv.es/satelite/trabajos/pract_15/sisbalan.htm
- **Interactive Wireless Network Design Analysis Utilities:** En esta página web se presentan multitud de scripts que permiten realizar el cálculo de balances de potencias, margen frente a desvanecimientos, pérdidas, zonas de cobertura, apuntamientos de antena y modelos de propagación. La página web es la siguiente:
<http://www.qsl.net/n9zia/wireless/page09.html#sthash.njD2U3lp.dpuf>
- **RF Toolbox:** una aplicación para iPhone de gran utilidad para las labores de diseño de un radioenlace, ya que además de realizar los cálculos de niveles de potencia y apuntamiento de antenas, también incorpora herramientas GPS para situar los extremos del radioenlace y realizar los cálculos correspondientes. Esta aplicación es de pago, y puede descargarse por 7.99 \$ en
<http://wirelesslanprofessionals.com/rf-toolbox-iphone-app/#sthash.njD2U3lp.dpuf>
- **AirLink:** Se trata de una aplicación web de la empresa Ubiquiti Networks para el cálculo de radioenlaces punto a punto. Aunque está configurada para seleccionar únicamente los equipos de la propia compañía, lo que resta flexibilidad a la herramienta, resulta útil por incorporar un *plug-in* con la cartografía de Google Earth, lo que permite identificar posibles obstáculos y tener en cuenta la orografía del

terreno. También, gracias a este *plug-in*, el usuario puede elegir la localización de las estaciones en cualquier punto del mapa. Disponible en <http://www.ubnt.com/airlink/>

- **RF Terrain Profiles:** es una aplicación para Android muy útil a la hora de representar perfiles de radioenlaces, realizar análisis del despejamiento y orientación rápida de las antenas de los emplazamientos en azimut y elevación. Dispone de una base de datos de emplazamientos y también es posible importar o exportar ficheros KML de Google Earth. La aplicación ha sido desarrollada en el grupo de investigación SiCoMo de la Universidad Politécnica de Cartagena y la comercializa la empresa Radiatio. Puede obtenerse en <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.version1> por 4.95€.

- **Satellite Link Budget Calculators:** es una herramienta desarrollada por la empresa Satcoms UK. Aunque está desarrollada por una empresa privada, el acceso a la aplicación es totalmente gratuito, por lo que cualquier usuario puede acceder a ella. El enlace para acceder a esta aplicación es el siguiente:

<http://www.satcoms.org.uk/satellite/satellite-link-budget-calculator.asp?title=satellite-link-budget-calculator>

En este link se pueden encontrar dos herramientas. Una más sencilla, en la que se pueden introducir menos parámetros (solamente se pueden introducir las frecuencias de transmisión y recepción, diámetros y eficiencias de antena de transmisión y recepción, anchos de banda y PIRE y G/T del satélite) y una más avanzada, que permite al usuario introducir una mayor cantidad de datos. Esta herramienta realiza el cálculo del balance de enlace (se obtiene la relación $\frac{C}{N_0}$ como resultado) en función de los datos introducidos.

- **VSAT Link Budget Calculator:** esta herramienta permite realizar los cálculos del balance de enlace de un sistema VSAT. Se puede acceder a esta herramienta en los siguientes enlaces

<http://www.satsig.net/link-budgets/paksat-vsatsat-outlink.htm>

<http://www.satsig.net/link-budgets/paksat-vsatsat-return-link.htm>

Está dividida en dos enlaces, el primero de ellos realiza el cálculo del balance de enlace desde el HUB hasta los terminales remotos, es decir, del enlace *outbound* y el segundo realiza el cálculo inverso, de los terminales VSAT al HUB, es decir, del enlace *inbound*.

Por otro lado, en la página <http://www.amsat.org.ar/SOFTWARE/> tenemos disponible más software relacionado con tracking y seguimiento de satélites:

TRACKING Y SEGUIMIENTO DE SATÉLITES	
Programa	Descripción
SHOWLOG.ZIP	Programa de tracking sobre el satélite LUSAT

<u>SATRKV17.ZIP</u>	Programa de tracking para sistemas Unix
<u>PCT3.ZIP</u>	Programa de tracking PC-Track, versión 3
<u>PCT2.ZIP</u>	Programa de tracking PC-Track, versión 2.1
<u>PGPB.ZIP</u>	Programa para satélites digitales
<u>STSPLUS.ZIP</u>	Programa de tracking utilizado en la NASA
<u>STSMAP.ZIP</u>	Programa de tracking utilizado en la NASA
<u>WISP9501.EXE</u>	Programa para microsátélites para Windows
<u>TRAK33.ZIP</u>	Programa de tracking TrakSat
<u>PREDICT.ZIP</u>	Programa de predicción orbital
<u>WNSAT.ZIP</u>	Programa de tracking de satélites para Windows
<u>GEOSAT20.ZIP</u>	Programa que obtiene la elevación y el azimut
<u>GEOSYNCH.ZIP</u>	Programa que permite apuntar una antena a un satélite síncrono
<u>PWRLINK.ZIP</u>	Programa que calcula en enlace satelital para Windows

Tabla 4: Software de tracking y seguimiento de satélites

También existe software desarrollado por universidades. **La Universidad Autónoma de Baja California**, en México, ha desarrollado un software educativo para el análisis y diseño de enlaces de telecomunicación por satélite. Este software está desarrollado con LabView y permite realizar el cálculo de la relación portadora a ruido del enlace de subida, bajada y total, las distancias de las estaciones terrenas al satélite, probabilidad de error, etcétera. El

programa también indica al usuario si es factible implementar ese enlace en función de los datos introducidos y en base a la probabilidad de error calculada. En caso de que no se cumplan los requisitos mínimos de probabilidad de error el usuario deberá cambiar datos hasta que se cumplan los requisitos. No es posible acceder a esta aplicación, pero se puede ver una descripción de la misma en el siguiente enlace:

[http://www.iiisci.org/journal/CV\\$/risci/pdfs/P612309.pdf](http://www.iiisci.org/journal/CV$/risci/pdfs/P612309.pdf)

La **Universidad de las Américas de Puebla**, también en México, ha desarrollado un software en Visual Basic, que consiste en una aplicación interactiva que permite realizar cálculos de balances de enlace entre satélites (a elegir LEO o GEO) y estaciones terrenas. Los resultados finales muestran la relación portadora a ruido del enlace de subida, del enlace de bajada y total (http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/campos_v_da/capitulo5.pdf). Igual que ocurre con la aplicación anteriormente descrita, ésta no es de acceso público.

Todas esas herramientas son similares a la que se va a desarrollar en este Trabajo Fin de Grado. Si se comparan las herramientas citadas con la desarrollada en el Trabajo Fin de Grado se puede observar que:

- En comparación con la primera herramienta, se puede observar que ambas son totalmente gratuitas y modificables por el usuario. En este caso basta con modificar la hoja de cálculo de Excel para tener nuevas versiones mejoradas. No obstante, existen diferencias, la más básica es que la herramienta del TFG está desarrollada solamente para sistemas VSAT, y las hojas de cálculo de la UPV no. Otra diferencia se encuentra en la interactividad con el usuario. En la herramienta de la UPV las unidades están pre-establecidas por el sistema, mientras que en la herramienta del TFG el usuario puede modificarlas según los requerimientos.

Existen más diferencias, otra es a la hora de calcular las pérdidas en el enlace. En esta aplicación, se pueden elegir pérdidas atmosféricas o pérdidas en espacio libre, en cambio, en la herramienta del TFG, el modelo de pérdidas atmosféricas no está implementado, sino que lo están el de propagación en espacio libre (explicado más adelante), y el modelo de Friis (ver anexo). Por último, otra diferencia está en los datos que se pueden introducir. En este caso, se introducen los datos para el enlace ascendente y para el enlace descendente. En el caso de la herramienta del TFG, no se introducen los datos por enlace, si no que se introducen los datos del HUB, del satélite y del terminal VSAT.

- En comparación con la segunda herramienta (***Interactive Wireless Network Design Analysis Utilities***), la aplicación del TFG realiza todas las funciones de manera integrada. En cambio, los scripts disponibles en la página web realizan las funciones de manera separada, con lo cual la interactividad es menor y la realización del análisis de un sistema resulta más tediosa.
- La tercera aplicación (***RF Toolbox***) es de pago y desarrollada únicamente para iPhone. La aplicación del TFG es totalmente gratuita y en principio no está diseñada para móviles. Esta aplicación es similar a la del TFG, ya que permite realizar los cálculos de potencia para el enlace, y determinar los puntos origen y destino de los terminales. En la aplicación que se va a desarrollar en este Trabajo Fin de Grado también será posible

introducir los puntos origen y destino del terminal VSAT, y determinar la trayectoria del terminal.

- Esta aplicación (**AirLink**) se diferencia de la del TFG porque ha sido desarrollada por una empresa privada, con lo que el objetivo sería obtener beneficio a través de ella. También, como se menciona, es limitada ya que solo permite realizar los cálculos de los radioenlaces para los propios equipos de la empresa. En cambio, la aplicación que se va a desarrollar es accesible para cualquier tipo de terminal y es totalmente pública. Además, esta herramienta solo realiza los cálculos para enlaces inalámbricos, es decir, dos terminales separados una determinada distancia, por lo que no se podría simular un sistema VSAT utilizándola.
- La aplicación **RF Terrain Profiles** se diferencia en que está desarrollada para el sistema operativo Android y es de pago. Esta aplicación permite realizar el cálculo del balance de enlace para un sistema inalámbrico, por lo que no cubre la necesidad de estudiar un sistema VSAT. Respecto al apartado de seguimiento, esta herramienta permite introducir la latitud y longitud de los terminales del sistema, igual que en la herramienta desarrollada en el TFG. También permite seleccionar la localización de los terminales gracias a la integración con Google Maps, por lo que la herramienta es muy gráfica e interactiva.
- La herramienta desarrollada por **Satcoms UK** no se puede modificar a gusto del usuario, al contrario que en el caso de la herramienta desarrollada en el TFG. Existen diferencias a la hora de introducir los datos. Como se ha mencionado en un caso anterior, en esta herramienta no se pueden elegir las unidades de los datos, sino que vienen ya predefinidas. Otra diferencia es que la cantidad de datos que se puede introducir es menor, limitando así la realización de los cálculos. Otra gran diferencia es que en esta herramienta no se simula ningún movimiento, sino que se hace el cálculo del balance de enlace fijo. No obstante también hay similitudes, como por ejemplo que ambas herramientas son totalmente gratuitas y accesibles.
- La herramienta **VSAT Link Budget Calculator** es la más similar a la del TFG, ya que realiza el cálculo del balance de enlace para un sistema VSAT. También es gratuita y accesible a través de internet. No obstante, existen diferencias relacionadas con la interactividad del usuario (menor cantidad de datos y unidades pre-establecidas), con la flexibilidad de la herramienta (el cálculo del balance de enlace se realiza bajo unas condiciones determinadas) y con el apartado gráfico (la herramienta es poco intuitiva, el manejo resulta difícil).
- Por otro lado, todas las aplicaciones de la tabla de “Tracking y Seguimiento de Satélites” se diferencian en el apartado técnico. Todas estas aplicaciones permiten realizar el tracking de satélites, que es el movimiento que sigue el satélite. En el caso de la aplicación que se va a desarrollar en el trabajo, se podrá realizar el seguimiento pero no del satélite, sino del terminal VSAT. El satélite supondremos que estará fijo a una altura indicada por el usuario y será el terminal VSAT el que varíe la trayectoria. El mecanismo de seguimiento del terminal VSAT será explicado en capítulos posteriores.
- Por último tenemos los dos software desarrollados por las universidades de Baja California y la de Américas de Puebla. Estos dos *softwares* permiten realizar los cálculos de la relación señal a portadora para los enlaces y de probabilidad de error, dando en el caso del *software* de la Universidad Autónoma de Baja California un

requisito mínimo de probabilidad de error. La mayor diferencia reside en que la aplicación que se va a desarrollar en el trabajo es para redes VSAT y no para cualquier otro sistema satelital, con lo que hay dos enlaces (*inbound* y *outbound*); y en que la aplicación permitirá realizar el seguimiento del terminal VSAT, calculando la relación portadora a ruido en todos los puntos del movimiento del terminal.

En los anexos se puede encontrar una tabla que muestra las diferencias entre todas las herramientas.

Como se ha podido observar al realizar la comparación con las distintas herramientas, la que se ha desarrollado en el Trabajo Fin de Grado cubre una necesidad que hasta ahora no había sido cubierta, ya que pocas de las herramientas permiten estudiar de una manera profunda los sistemas VSAT.

Además, la aplicación que se va a desarrollar en este Trabajo Fin de Grado es una aplicación **gratuita**, de **código abierto** y de libre uso y utilización. El código del software estará disponible para todo el mundo, de tal forma que cualquiera que lo quiera podrá descargarlo y añadir nuevas mejoras y nuevas funcionalidades, incluso cambiar cualquier aspecto que considere conveniente.

También es muy importante destacar que esta aplicación tiene **finés educativos**, es decir, que una vez que esté totalmente terminada podrá ser utilizada como una herramienta más para la docencia.

3. Comunicaciones vía satélite.

3.1 Introducción.

Para poder justificar la necesidad de realizar esta investigación y este trabajo fin de grado, es necesario plantearse las siguientes cuestiones: ¿Por qué son importantes las comunicaciones vía satélite? ¿Cómo hemos llegado hasta ellas? ¿Qué son los terminales VSAT y qué ventajas nos ofrecen respecto a otros tipos?

Los satélites de telecomunicaciones son una de las partes más importantes de las comunicaciones, no solo por el avance a nivel de comunicaciones que supusieron, sino también por los factores militares, sociales y políticos que determinaron su creación y su descubrimiento.

Una de las referencias más importantes a los satélites de comunicaciones fue realizada por el escritor *Arthur C. Clarke*, que escribió lo siguiente en su obra *2001. Una odisea en el espacio* (1968):

“Un satélite artificial a la distancia apropiada de la tierra puede hacer una revolución cada 24 horas, esto es, podría parecer estacionario sobre un punto de la superficie de la Tierra, y tendría un rango óptico de casi la mitad de la superficie terrestre. Tres estaciones repetidoras, con una separación de 120º entre sí, pueden dar cobertura de señales de radio y microondas a todo el planeta”.

Basándose en la idea escrita por Clarke en su obra, en la necesidad de comunicar puntos lejanos, y como consecuencia de la Guerra Fría, en la que tanto la Unión Soviética como los Estados Unidos querían llegar cuanto antes a la luna y lanzar satélites para dominar el espacio, en 1957 la URSS lanzaba el primer satélite al espacio, el SPUTNIK I (*compañero de viaje*, en ruso). Este satélite era una esfera de aluminio de 58 cm de diámetro y con un peso de 83kg, y enviaba información a la Tierra sobre radiación cósmica, meteoritos y sobre la densidad y temperatura de las capas superiores de la atmósfera. La recepción de esa señal de radio en la tierra supuso un gran impacto en la población mundial, y desde ese momento se dio comienzo a la era de las comunicaciones vía satélite.

Posteriormente, Estados Unidos lanzaba al espacio el satélite EXPLORER, en 1958, con funciones similares a las realizadas por el satélite SPUTNIK. La URSS por su parte, no se quedaba atrás, y también lanzaron al espacio los satélites SPUTNIK II y SPUTNIK III. De la misma manera continuaba la carrera por el dominio del espacio, hasta que el 18 de diciembre de 1958 se lanzó el satélite SCORE, que puede considerarse como el primer satélite de comunicaciones pasivo. Este satélite disponía de un transmisor que radiaba la información contenida en un magnetófono, constituida por el mensaje de felicitación de navidad del presidente Eisenhower.

El primer satélite activo de telecomunicaciones lanzado al espacio fue el Telstar I, un satélite norteamericano financiado por la empresa AT&T. Fue lanzado al espacio el 10 de julio de 1962 y tenía dos objetivos:

- Transmitir señales de televisión.
- Transmitir conversaciones a través del Océano Atlántico.

Este satélite tiene una gran importancia, ya que gracias a él se pudo hacer la primera llamada telefónica transmitida a través de satélite, lo que supone un hito importante en la historia.

Posteriormente se han seguido poniendo satélites en órbita, como el EISYNCOM (el primer satélite GEO puesto en órbita, en 1963), el INTELSAT I (primer satélite internacional de órbita geo-síncrona, en 1965), o el MOLNIYA (formado por 4 satélites en órbitas elípticas con una cobertura de 6 horas por satélite, lanzado por la Unión Soviética en 1967).

Actualmente hay cientos de satélites activos de comunicaciones en órbita. Reciben las señales de una estación terrestre, las amplifican y las retransmiten con una frecuencia distinta a otra estación. Cada banda de frecuencias utilizada, de un ancho de 500 MHz, se divide en canales repetidores de diferentes anchos de banda (ubicados en 6 GHz para las transmisiones ascendentes y en 4 GHz para las descendentes). También se utiliza mucho la banda de 14 GHz (ascendente) y 11 o 12 GHz (descendente), sobre todo en el caso de las estaciones fijas (no móviles). En el caso de las estaciones pequeñas móviles (barcos, vehículos y aviones) se utiliza una banda de 80 MHz de anchura en los 1,5 GHz (ascendente y descendente). Las baterías solares montadas en los grandes paneles de los satélites proporcionan la energía necesaria para la recepción y la transmisión.

En definitiva, los satélites de comunicación suponen una alternativa muy potente a otros sistemas de comunicación, como pueden ser radioeléctricos, por cables submarinos, etcétera. Esto es debido a que un satélite puede alcanzar puntos de la superficie terrestre de difícil acceso y pueden cubrir grandes distancias (solo un satélite geoestacionario puede cubrir 1/3 de la superficie terrestre) para la transmisión de información a un amplio conjunto de receptores, con una alta capacidad y siendo económicamente viables. También presentan inconvenientes, como puede ser el que los equipos de comunicación y control que forman parte del satélite tienen que tener una fiabilidad muy elevada, ya que una vez lanzado el satélite es imposible la reparación. Por esto, los satélites se presentan como un **complemento** a otros sistemas de comunicación, no como un sustituto.

Y en concreto, ¿por qué redes VSAT? Las redes VSAT (*Very Small Aperture Terminals*) son un tipo de redes de comunicaciones por satélite que proporcionan servicios FSS (*Fixed Satellite Services*) y utilizan estaciones pequeñas en las instalaciones del usuario. Están formadas por: HUB, satélite y terminal VSAT, como puede observarse en la imagen procedente de la siguiente web,

<http://www.publicaciones.urbe.edu/index.php/telematique/article/viewFile/873/2158/6628>

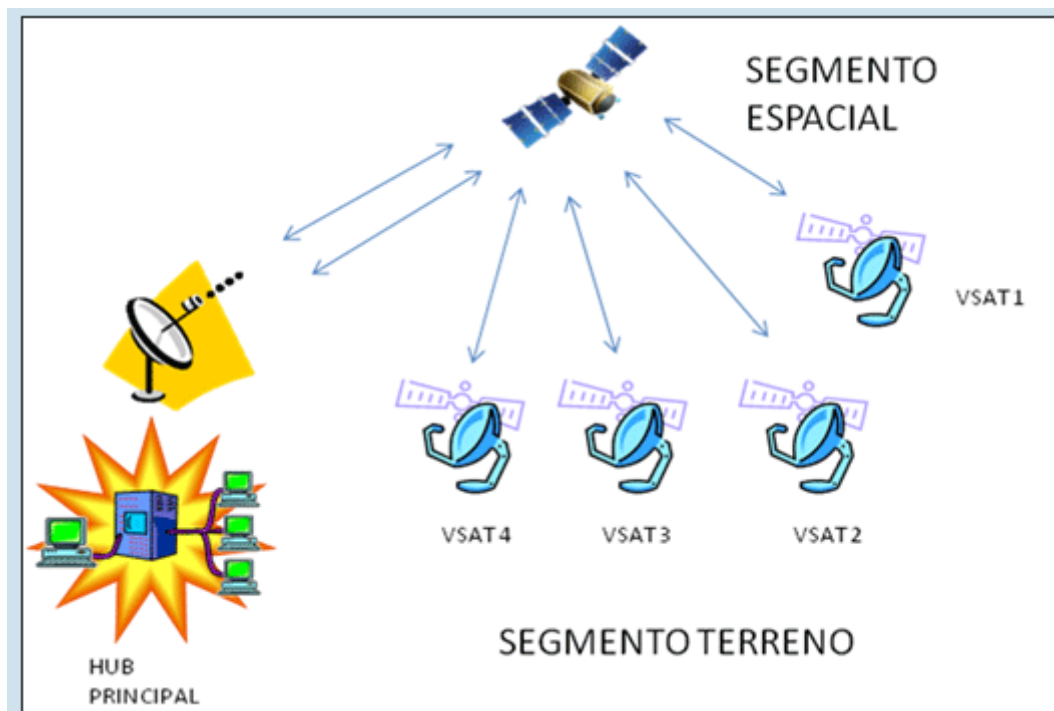


Imagen 8: Esquema de una red VSAT.

Más adelante, en el apartado “3.8 Sistemas VSAT.” se explican de manera detallada todos los aspectos relacionados con los sistemas VSAT.

3.2 Definición, características, servicios.

Según la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones), se definen las comunicaciones como “Toda transmisión, emisión o recepción de signos, señales, escritos, imágenes, sonidos o información de cualquier naturaleza, por cable, radio, medios ópticos u otros medios electromagnéticos”. Por tanto, las comunicaciones por satélite serán aquellas que utilicen un satélite como un punto superior para un enlace de telecomunicaciones entre puntos terrestres.

Las características generales que ofrece un sistema de comunicaciones vía satélite son:

- Flexibilidad.
 - Este tipo de sistemas ofrece la posibilidad de tener una cobertura muy amplia –con un satélite GEO se cubre 1/3 del área de la Tierra–.
 - Posibilita las comunicaciones en áreas aisladas y con dificultades geográficas.
 - Hace que sea más fácil la reconfiguración del propio sistema y la realización de cambios de tráfico.
 - Permite un rápido establecimiento de las redes.
 - Ofrece posibilidad de comunicaciones eventuales.
- El coste de las comunicaciones es independiente de la distancia.

- Vida limitada y riesgo de fallo destructivo en lanzamiento. Como la reparación no es posible una vez se ha producido el lanzamiento del satélite y puesta en órbita, la fiabilidad debe ser muy elevada.
- Sistemas económicamente viables.
- Retardo temporal importante.

Las comunicaciones vía satélite ofrecen una gran cantidad de servicios. De todos los servicios que ofrecen, se pueden destacar:

- **Servicio fijo por satélite (FSS):** son enlaces entre puntos fijos. La estación terrena transmisora envía una señal al satélite, y este envía la señal a una estación terrena receptora. En este caso, ambas estaciones terrenas están fijas. Algunos ejemplos de este servicio son la telefonía, la televisión, datos, enlaces internacionales, etcétera.
- **Servicios móviles por satélite (MSS):** enlace entre puntos en movimiento. En este caso, las estaciones terrenas –transmisora o receptora– están en movimiento. Por ejemplo, servicios terrestres, servicios marítimos y servicios aeronáuticos.
- **Servicio de radiodifusión por satélite (BSS):** la radiodifusión –también conocido el término *broadcasting*– es la emisión de señales para uso público generalizado o muy amplio. Este servicio abarca emisiones sonoras, de televisión o de otro género. Este servicio es ofrecido por las comunicaciones vía satélite ya que muchas de las señales emitidas por las estaciones espaciales tienen como destino la recepción directa por el público. Un ejemplo de este tipo de servicio es la difusión directa a los hogares (DTH).
- **Redes de transmisión de datos:** se pueden formar redes públicas y privadas con distintas estructuras (mallada o en estrella).
- **Servicios multimedia:** integración de voz, imágenes, datos, etcétera.
- **Servicio de radiodeterminación:** se define como la determinación completa o parcial de la posición, velocidad u otras características por medio de ondas radioeléctricas.
- **Servicio de exploración de la Tierra:** se puede utilizar este servicio para:
 - Meteorología.
 - Geodesia, que es la ciencia que tiene como objetivo el estudio y determinación de la forma, dimensiones y campo de gravedad de la Tierra. También se encarga de realizar los mapas topográficos de los países.
 - Exploración de recursos.
- **Servicio de exploración del espacio.**
- **Servicio de radioaficionados:** se conoce como radioafición, según la UIT, al servicio que tiene como objetivo la auto-instrucción, la intercomunicación y las investigaciones técnicas efectuadas por aficionados. Se entiende por aficionados aquellas personas debidamente autorizadas, interesadas en la radiotécnica, con carácter personal y sin ánimo de lucro.
- **Servicio entre satélites.**

Para poder realizar cualquier transmisión de datos, es necesario disponer de bandas de frecuencia en el espectro radioeléctrico. Las bandas de frecuencias que se utilizan en las comunicaciones vía satélite son:

- **Banda L:** comprende de 1,5 a 2 GHz. En concreto, el enlace ascendente comprende las frecuencias de 1.61 – 1.66 GHz y de 1.93 – 2.01 GHz. El enlace descendente comprende el rango de 1.452 GHz a 1.61 GHz. Esta banda de frecuencias se utiliza para comunicaciones móviles por satélite.
- **Banda S:** comprendida entre 2 y 3 GHz. El enlace ascendente abarca de 2.025 GHz a 2.11 GHz y el enlace descendente de 2.29 GHz a 2.5 GHz. Esta banda es utilizada para comunicaciones móviles por satélite, comunicaciones fijas y servicios de radiodifusión.
- **Banda C:** comprendida entre 4 y 6 GHz. En el caso de USA y otros satélites nacionales, el enlace ascendente está comprendido entre 5.925 y 6.425 GHz, y el descendente entre 3.7 y 4.2 GHz. En el caso de los satélites rusos, el enlace ascendente va desde 5.725 a 6.275 GHz, y el descendente de 3.4 a 3.9 GHz. En el caso de bandas ampliadas, el enlace ascendente va desde los 5.850 GHz hasta los 7.075 GHz y el descendente desde los 3.5 GHz a los 4.2 GHz. Esta banda, fue el primer rango de frecuencias utilizado para las transmisiones satelitales. Esta banda es utilizada por satélites como el Intelsat, Westar, Satcom, Comstar, Telecom I, Molniya, Intersputnik, etcétera.
- **Banda X:** comprendida entre 7 y 8 GHz. En concreto, el enlace ascendente va desde los 7.925 GHz hasta los 8.425 GHz y el descendente desde 7.25 hasta 7.75 GHz. El uso principal de esta banda es para satélites gubernamentales y militares.
- **Banda Ku:** comprendida entre 11 y 13 GHz. Para el enlace ascendente se usan los rangos comprendidos entre los 12.75 y 13.25 GHz y entre los 14 y 14.5 GHz. Para el enlace descendente el rango de frecuencias es el comprendido entre 10.7 y 12.75 GHz. Esta banda de frecuencias es utilizada por Intelsat, Eutelsat, satélites nacionales y DBS –*Direct Broadcast Satellite*, servicio de radiodifusión directo vía satélite–.
- **Banda K:** comprendida entre 12 y 18 GHz. El enlace ascendente en concreto abarca desde los 17.3 GHz hasta los 18.4 GHz. Esta banda de frecuencias es utilizada para servicios de radiodifusión y para servicios fijos.
- **Banda Ka:** comprendida entre 20 y 30 GHz. El enlace ascendente utiliza el rango de frecuencias comprendido entre 27.5 y 31 GHz mientras que para el enlace descendente el rango de frecuencias es de 17.2 GHz a 21.2 GHz. Esta banda de frecuencias es utilizada por los satélites japoneses, europeos y americanos, y se suele utilizar para enlaces intersatelitales.

Esta información sobre las bandas de frecuencia se puede observar en la siguiente tabla, sacada del siguiente enlace:

<http://ocw.upm.es/teoria-de-la-senal-y-comunicaciones-1/radiocomunicacion/contenidos/presentaciones/satelites-07.pdf>

Banda	Rango Frecuencias Uplink (GHz)	Rango Frecuencias Downlink (Ghz)	Utilización
L (1,5 - 2 GHz)	1,61 - 1,66 1,93 - 2,01	1,452 - 1,61	Servicios móviles (marítimo, terrestre y aeronáutico)
S (2 - 3 GHz)	2,025 - 2,11	2,29 - 2,5	Servicios móviles / Reservados (TT&C)
C (6/4 GHz)	5,925 - 6,425	3,7 - 4,2	Servicios fijos / DBS

X (8/7 GHz)	7,900 - 8,395	7,250 - 7,745	Militar / Gubernamental
Ku (13/11 GHz)	12,75 - 13,25 14 - 14,5	10,7 - 12,75	Intelsat, Eutelsat, satélites nacionales, DBS
K (18/12 GHz)	17,3 - 18,4		Servicios de radiodifusión y servicios fijos
Ka (30/20 GHz)	27,5 - 31	17,2 - 21,2	Enlaces intersatélites. Investigación

Tabla 5: Bandas de frecuencia satelitales.

3.2.1 Composición: segmento espacial y segmento terreno.

Un sistema de comunicaciones está formado por dos partes, el **segmento espacial**, y el **segmento terreno**.

El segmento espacial está formado, en primer lugar, por el satélite y por el centro de control del satélite desde tierra.

El satélite, a su vez, está formado por la **plataforma** y por la **carga útil**. La plataforma se define como los subsistemas y estructuras auxiliares que no intervienen directamente en la misión pero son indispensables para el funcionamiento del satélite.

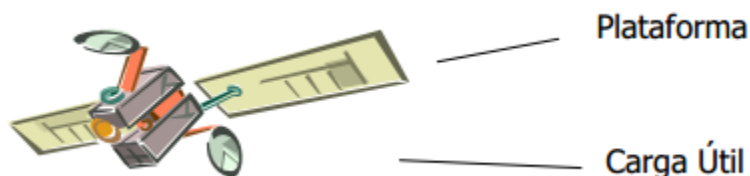


Imagen 9: Constitución de un satélite

Los subsistemas de la plataforma son:

- Subsistema de estructura.
- Subsistema de control térmico.
- Subsistema de propulsión.
- Subsistema de control orbital y de posición (Actitud y Órbita, AOCS).
- Subsistema TT&C (*Telemetry, Tracking and Command*).
- Subsistema de energía.
- Mecanismo de despliegue de antenas.

El subsistema de estructura proporciona el interfaz mecánico con el lanzador, y sirve como soporte estructural durante la fase de integración, pruebas, lanzamiento y operaciones

orbitales. Tiene que cumplir una serie de condiciones respecto a la masa total, a la rigidez y a la resistencia.

El subsistema de control térmico tiene como función mantener dentro de unos márgenes de temperatura adecuados los equipos y la estructura del satélite. Las deformaciones estructurales deben minimizarse para asegurar un funcionamiento correcto del apuntamiento del satélite y funcionamiento de los subsistemas. Los márgenes de temperatura de funcionamiento del satélite son:

- Baterías: de 0°C a +20°C
- Células solares: de -100°C a +50°C.
- Equipos electrónicos: de -10°C a +60°C.
- Tanques de combustible: de +10°C a +50°C.
- Sensores de infrarrojo: de -20°C a +45°C.
- Antenas: de -150°C a +80°C.

Para controlar que la temperatura se encuentra dentro de los márgenes adecuados, hay que tener en cuenta la capacidad que tienen los materiales para absorber o reflejar la radiación infrarroja. El subsistema de control térmico está formado por tuberías de conducción (*heat pipes*), que dispersan el calor por conducción –evaporación y condensación–. El interior de estas tuberías está formado por amoníaco, el cual se evapora y por presión va al extremo frío, donde se encuentra el radiador, por lo que se condensa y vuelve a circular.

El subsistema de propulsión se encarga del mantenimiento de la órbita y/o mantenimiento en estación. En el caso de satélites GEO se utiliza para que estos siempre vean la misma superficie de la Tierra. Así mismo, el subsistema de propulsión realiza la transferencia a la órbita final. Para diseñar el subsistema de propulsión hay que tener en cuenta dos parámetros:

- Empuje: es la fuerza proporcionada por el motor.
- Impulso específico: medida del contenido energético del propulsante y de su eficiencia para producir empuje.

El subsistema de control orbital y de posición AOCS está formado por los motores que recolocan al satélite en la órbita y por los elementos inerciales que lo estabilizan y controlan en altura. Este subsistema también mantiene las antenas apuntadas a Tierra y los paneles solares al Sol. Para controlar el apuntamiento se utilizan detectores del Sol, detectores de infrarrojos del borde de la Tierra, estelares, sensores de RF y centrales inerciales. Otras funciones –aparte de las mencionadas anteriormente– del subsistema AOCS son el procesado de telecomandos, la generación de telemetría, la detección de fallos y aislamiento, la recuperación de fallos y la ejecución de maniobras.

El subsistema de telemetría, telemando y seguimiento (TT&C: *Telemetry, Tracking and Command*) existe tanto en los satélites como en las estaciones terrenas de control. Este subsistema se encarga de realizar las actuaciones necesarias para medir parámetros del satélite y comandos de corrección.

El subsistema de energía es el encargado de generar, almacenar y distribuir la energía eléctrica necesaria para la operación de los equipos del satélite en función de su eficiencia, es decir, es el encargado de proporcionar la energía eléctrica necesaria al satélite. Este subsistema se compone de fuentes de energía primaria, que son los paneles y células solares, de fuentes de energía secundarias (baterías de Ni-Cd generalmente, necesarias para los eclipses y para el lanzamiento) y de elementos de acondicionamiento y protección. El flujo solar para los satélites GEO es de 1.39kW/m^2 . Las células solares generan energía gracias al efecto fotovoltaico, es decir, debido a la aparición de una tensión eléctrica cuando en los bordes de una unión p-n incide un haz de fotones. La eficiencia de estos paneles es del 10 al 15% y es necesario que tengan la protección adecuada para filtrar la radiación solar para las cuales las células solares no sean sensibles.

Los paneles solares están formados por miles de células. Para diseñar las dimensiones de cada panel solar se deben utilizar las siguientes ecuaciones:

$$P_{1celda} = \phi es(1 - l) \quad (15)$$

Siendo e la eficiencia, s la superficie y l las pérdidas, y donde $\phi = W \left(\frac{a^2}{d^2} \right) \cos \theta$ siendo a la distancia media al Sol, y d la distancia real al Sol. Por otro lado, para obtener el área del panel, se utiliza la siguiente ecuación,

$$A = \left(\frac{P}{P_{1celda}} \right) s / f \quad (16)$$

Donde s es la superficie y f la eficiencia de relleno.

La carga útil del satélite es el conjunto de repetidores y antenas gracias a los cuales se realiza la comunicación.

Las antenas pueden ser de diversos tipos:

- De hilo, como monopolos o dipolos, que se utilizan cuando la transmisión debe ser omnidireccional.
- Bocinas, que proporcionan un haz más ancho y una cobertura global.
- Reflectores, que proporcionan un haz más estrecho.
- Arrays, que son conjuntos de antenas.

Un transpondedor es un dispositivo utilizado en telecomunicaciones cuyo nombre proviene de la fusión de los términos ingleses “*Transmitter*” y “*Responder*”. Con este término, se hace referencia a aquellos equipos que realizan las siguientes funciones:

- Recepción, amplificación y retransmisión de señales. El proceso es, el satélite recibe la señal, la amplifica y la retransmite en una banda de frecuencias diferente a la utilizada anteriormente. Este tipo de transpondedores es el que se utiliza en las comunicaciones espaciales, ya que es necesario adaptar la señal del satélite a la frecuencia de los equipos receptores en banda base.

- Existen otros tipos de transpondedores, que se utilizan en aeronáutica para los sistemas de pseudo-radar. Estos últimos transpondedores tienen como función la respuesta automática de un mensaje posterior a la recepción de una señal concreta de interrogación.

Como ya se ha introducido, el transpondedor recibe una señal concreta de una fuente –en el caso de las comunicaciones vía satélite, el transpondedor recibe la señal procedente de las estaciones terrenas–. Una vez que la señal se ha recibido, se amplifica antes de retransmitirla. También se realiza una conversión de frecuencias, es decir, la señal inicial se recibe en una determinada banda y la retransmisión se realiza en una banda de frecuencias diferente a la banda inicial.

Un transpondedor se compone de un filtro de entrada, un amplificador de bajo ruido, un conversor de frecuencias y un amplificador de potencia.

El filtro de entrada limita el ruido total que llega al amplificador de bajo ruido. El amplificador de bajo ruido se utiliza para amplificar señales débiles y para reducir las pérdidas debidas a la línea de alimentación. Es necesario utilizar un amplificador de bajo ruido –también conocido como LNA: *Low Noise Amplifier*– cuando se quiere obtener una buena relación señal a ruido en la recepción. Para su diseño se puede utilizar tecnología CMOS, recomendable gracias a su bajo coste y consumo y a su alta integración. La salida del amplificador de bajo ruido alimenta un conversor de frecuencia –formado por un oscilador de desplazamiento y un filtro paso banda, que se encargan de convertir la frecuencia de subida de una banda de frecuencia superior a una frecuencia de bajada de una banda de frecuencia inferior. El amplificador de potencia se encarga de amplificar la señal de RF para su posterior transmisión a los receptores de la estación terrena. Como amplificador de potencia se utilizan tubos de ondas progresivas (TWT) y amplificadores de estado sólido (SSP).

Se pueden diferenciar dos tipos de transpondedores, los activos y los pasivos. Los transpondedores activos son todos aquellos equipos interconectados que modifican y adecúan la señal desde el receptor hasta el emisor, con el fin de retransmitir la información recibida. En estos sistemas, el transpondedor transmite en una frecuencia distinta a la que recibe. Este tipo de transpondedores se utilizan en sistemas con alcance alto, por ejemplo, televisión por satélite.

Por otro lado los transpondedores pasivos son aquellos elementos identificados por escáneres, robots u ordenadores. Para ello, es necesario que interactúen con un sensor, que se encarga de decodificar la información contenida y de transmitirla al centro de datos. Estos transpondedores tienen un alcance muy limitado en comparación a los transpondedores activos.

También existen transpondedores regenerativos, cuyo esquema es el siguiente:

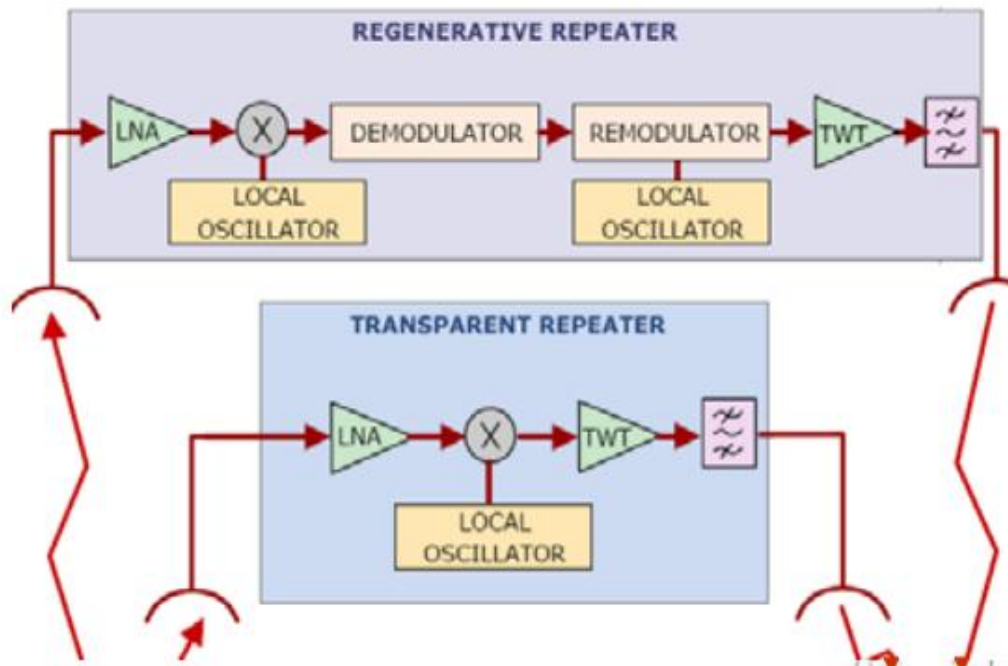


Imagen 10: Transpondedor regenerativo.

Los transpondedores regenerativos se caracterizan porque no existe degradación por no linealidad, existe adaptación de la información al enlace de subida y al enlace de bajada y porque la demodulación permite independizar el enlace ascendente y descendente.

Tal y como se comentó al inicio de este apartado, además del segmento espacial, un sistema de comunicaciones está formado por el segmento terreno. El **segmento terreno** está formado por la estación terrena de transmisión y por la estación terrena de recepción. A su vez, estas estaciones pueden tener sistemas de antenas, amplificadores de recepción de bajo ruido, amplificadores de potencia, convertidores de frecuencia, moduladores, demoduladores, equipos de multiplexación y demultiplexación, equipos auxiliares, etcétera. Las antenas son similares a las que se han mencionado para el segmento espacial. En el caso de los amplificadores de bajo ruido y de potencia son análogos al caso del transpondedor. El convertidor de frecuencia se utiliza para convertir las señales de frecuencia intermedia (FI) a microondas (RF). Los moduladores y demoduladores superponen o extraen las señales de información a la portadora de frecuencia intermedia. Para señales analógicas se utiliza la modulación FM (*Frequency Modulation*), en cambio, para señales digitales se utiliza la modulación QPSK (*Quadrature Phase-Shift Keying*).

La estación terrena de transmisión se encarga de recibir la señal en banda base –señal que suele ser de telefonía, datos o vídeo–. Posteriormente dicha señal es modulada y se pasa a una portadora en frecuencia intermedia. Después se pasa a RF (radiofrecuencia), se amplifica y se transmite. Se requiere una transmisión con potencias y directividades elevadas.

La estación terrena de recepción se compone de un **receptor superheterodino**. Se entiende por receptor superheterodino aquel sistema de recepción de señales de radio basado en el heterodinaje de ondas electromagnéticas.

La heterodinación es el proceso a través el cual, debido a la superposición de dos ondas de frecuencias diferentes (aunque próximas entre sí), se obtiene una única onda de amplitud modulada a una frecuencia, llamada **frecuencia heterodina**, cuyo valor es igual a la diferencia de la frecuencia de las ondas combinadas. Este fenómeno se produce cuando las frecuencias de las ondas que se combinan no son muy diferentes entre sí.

En el caso de un receptor superheterodino, la heterodinación se produce combinando dos oscilaciones de alta frecuencia, una procedente del emisor –que es captada por la antena del receptor–, y otra generada por el mismo receptor mediante un oscilador local.

La frecuencia resultante es la llamada frecuencia intermedia, y es constante. Por este motivo, es necesario que se realice un cambio en los circuitos del receptor, de forma que la frecuencia generada por el oscilador local varíe de acuerdo con la frecuencia de la estación sintonizada, para que así la suma o diferencia de las frecuencias tenga el mismo valor.

Una vez obtenida la señal de frecuencia intermedia, se debe amplificar y finalmente modificar de nuevo su frecuencia. Por esto, el receptor superheterodino realiza una doble conversión de frecuencias.

Un receptor superheterodino se compone de las siguientes etapas:

- Etapa amplificadora de radiofrecuencia.
- Etapa osciladora local.
- Etapa de heterodinación.
- Etapa amplificadora de frecuencia intermedia.
- Etapa de detección.
- Etapa amplificadora de baja frecuencia.
- Etapa de alimentación.

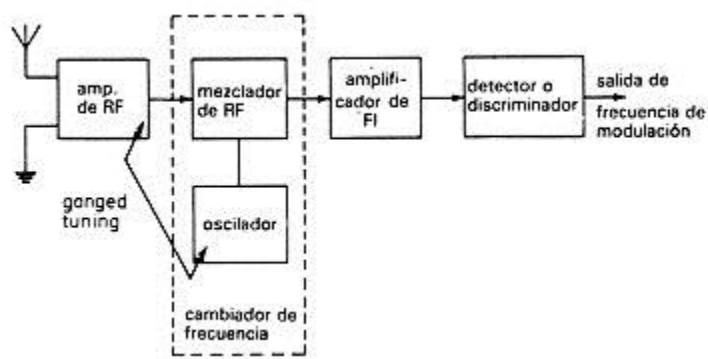


Imagen 11: Diagrama de bloques de un receptor superheterodino.

(<http://www.sapiensman.com/ESDictionary/imagenes/superheterodino.jpg>)

En primer lugar, la señal recibida de una antena llega al amplificador de radiofrecuencia. Posteriormente, en la etapa osciladora se genera una corriente de frecuencia variable, que se combina con la frecuencia anterior en la etapa de heterodinación, obteniéndose así la frecuencia intermedia. A continuación, la onda de frecuencia heterodina se amplifica en la etapa amplificadora de frecuencia intermedia mediante circuitos resonantes. Después, la señal

procedente de la etapa amplificadora de frecuencia intermedia pasa a la etapa de detección y por último pasa por la etapa amplificadora de baja frecuencia.

La estación terrena, aparte de estar formada por el receptor superheterodino, también está compuesta por una antena muy directiva y por un receptor de muy bajo factor de ruido. De manera general, las funciones de la estación terrena de recepción son la amplificación de la señal recibida, la conversión a frecuencia intermedia, la demodulación, la multiplexación y el encaminamiento.

3.2.2 Claves de un sistema de comunicación por satélite.

Para realizar un diseño satisfactorio de un sistema de comunicaciones vía satélite es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

- **Órbitas:** todos los satélites han de estar situados en una órbita. En función de la aplicación final del sistema, se utilizará una órbita u otra. Existen distintos tipos de órbitas, con sus características, que son más o menos convenientes en función de la aplicación final del sistema.

- **Cobertura:** dependerá del tipo de antena que se utilice y del ancho de haz. Se puede conseguir un haz global, con el que se cubre 1/3 de la superficie terrestre, un haz puntual y un haz conformado, que se utiliza para coberturas intermedias, e.g: para un país, archipiélago, etcétera. Hay que diferenciar entre la cobertura geométrica –superficie de la Tierra que se ve como un cono desde el satélite tangente a la Tierra–, y cobertura radioeléctrica –que depende de cada satélite y de sus antenas–.

- **Conectividad:** se entiende por conectividad la capacidad de efectuar enlaces vía satélite entre estaciones terrenas. Depende de la capacidad del satélite y de las técnicas de acceso múltiple.

- **Acceso múltiple:** forma de compartición del satélite. Existen distintos métodos: FDMA, TDMA, CDMA, los cuales se explicarán más adelante.

- **Banda de frecuencia y ancho de banda:** según el servicio y la disponibilidad se utilizarán distintas bandas de frecuencia –se han explicado anteriormente las bandas utilizables–.

- **Potencia:** se busca la potencia del sistema adecuada para que exista un compromiso entre la distancia satélite – Tierra y las limitaciones de energía existentes en el satélite.

- **Eclipses:** los satélites GEO sufren eclipses de forma periódica. Este aspecto es importante, y debe tenerse en cuenta a la hora de diseñar el satélite (previsión de las baterías solares). Estos eclipses se deben al movimiento del Sol respecto a la Tierra y el satélite. Suelen darse en los equinoccios. Por otro lado, existe el caso conocido como interferencia solar. Las interferencias solares ocurren cuando el sol cruza el plano ecuatorial de la Tierra y queda alineado con el satélite y el haz de la antena de una estación terrena. Esto provoca un aumento de la temperatura de la antena, que interfiere con la transmisión en condiciones normales. La interferencia solar es un fenómeno predecible, ya que depende de la posición

geográfica de la estación terrena y la longitud del satélite. Cuanto menor es el diámetro de la antena, mayor es la duración de la interferencia solar, ya que el haz es de mayor apertura. Se produce en dos ocasiones cada año. La primera ocasión coincide con el equinoccio de primavera y la segunda durante el de otoño.

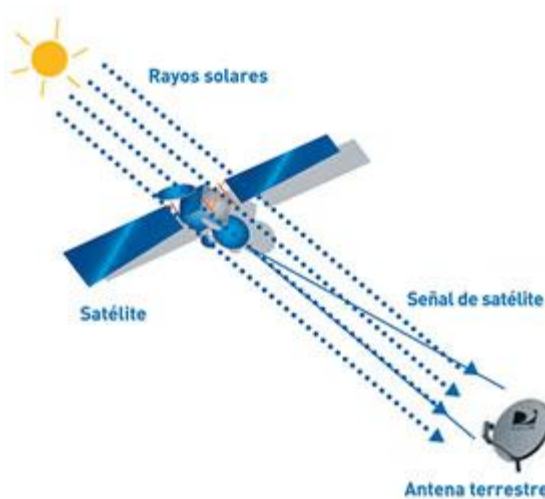


Imagen 12: Interferencia solar
(<http://www.coteor.net.bo/images/13040101.jpg>).

3.3 Órbitas. Definición y clasificación.

3.3.1 Definición.

La definición más sencilla de órbita es la siguiente: “En física, una **órbita** es la trayectoria que describe un objeto físico alrededor de otro mientras está bajo la influencia de una fuerza central, como la fuerza gravitatoria.”

Las órbitas se analizaron por primera vez de forma matemática por Johannes Kepler. Kepler formuló sus resultados en tres leyes –que serán explicadas en profundidad más adelante–. De forma resumida, la primera encontró que las órbitas de los planetas en el Sistema Solar son elípticas y no circulares o epiciclos, como se pensaba antes, y que el Sol no se encontraba en el centro de sus órbitas sino en uno de sus focos. La segunda, que la velocidad orbital de cada planeta no es constante, si no que depende de la distancia entre el planeta y el Sol. En la tercera, Kepler encontró una relación universal entre las propiedades orbitales de todos los planetas orbitando alrededor del Sol. Para cada planeta, la distancia entre el planeta y el Sol al cubo, medida en unidades astronómicas, es igual al periodo del planeta al cuadrado, medido en años terrestres.

Isaac Newton demostró que las leyes de Kepler se derivaban de su teoría de la gravedad y que, en general, las órbitas de los cuerpos que respondían a la fuerza gravitatoria eran secciones cónicas. Isaac Newton demostró que un par de cuerpos siguen órbitas de dimensiones que son inversamente proporcionales a sus masas sobre su centro de masas común. Cuando un cuerpo es mucho más masivo que el otro, se decide tomar como centro de masas el centro del cuerpo con mayor masa.

Dentro de un sistema planetario, los planetas, planetas enanos, asteroides, cometas y la basura espacial orbitan alrededor de la estrella central con órbitas elípticas. Un cometa en una órbita parabólica o hiperbólica alrededor de una estrella central no tiene un lazo gravitatorio con la estrella y por tanto no se considera parte del sistema planetario de la estrella. Los cuerpos que tienen un lazo gravitacional con uno de los planetas del sistema planetario, ya sean naturales o artificiales realizan órbitas elípticas alrededor del planeta.

Debido a las perturbaciones gravitatorias mutuas, las excentricidades de las órbitas de los planetas varían a lo largo del tiempo.

Cuando dos objetos orbitan sobre sí, el periastro es el punto en el que los dos objetos se encuentran más próximos el uno al otro y el apoastro es el punto donde se encuentran más lejos.

En una órbita elíptica, el centro de masas de un sistema entre orbitador y orbitado se sitúa en uno de los focos de ambas órbitas, sin nada en el otro foco. Cuando un planeta se acerca a su periastro, el planeta incrementa su velocidad. De igual manera, cuando se acerca a su apoastro, disminuye su velocidad.

3.3.2. Clasificación.

Se pueden clasificar las órbitas de las siguientes formas:

- Según sus características:
 - Órbita circular
 - Órbita eclíptica
 - Órbita elíptica
 - Órbita cementerio
 - Órbita de transferencia de Hohmann
 - Trayectoria hiperbólica
 - Órbita inclinada
 - Trayectoria parabólica
 - Órbita de captura
 - Órbita de escape
 - Órbita semisíncrona
 - Órbita subsíncrona
 - Órbita síncrona
- Según el cuerpo central alrededor del que orbitan:
 - Órbitas terrestres
 - Órbita geocéntrica
 - Órbita geosíncrona
 - **Órbita geoestacionaria (GEO)**
 - Órbita de transferencia geoestacionaria
 - **Órbita baja terrestre (LEO)**

- Órbita media terrestre
 - Órbita de Molniya
 - Órbita casi ecuatorial
 - Órbita de la Luna
 - Órbita polar
 - Órbita tundra
- Órbitas marcianas
 - Órbita aerosíncrona
 - Órbita aeroestacionaria
- Órbitas lunares
 - Órbitas solares
 - Órbita heliocéntrica
 - Órbita heliosíncrona

Se pueden destacar la órbita geoestacionaria (GEO) y la órbita de baja altura (LEO). En este caso, nos vamos a centrar en la órbita geoestacionaria, que es la que utilizan los satélites que forman redes VSAT.

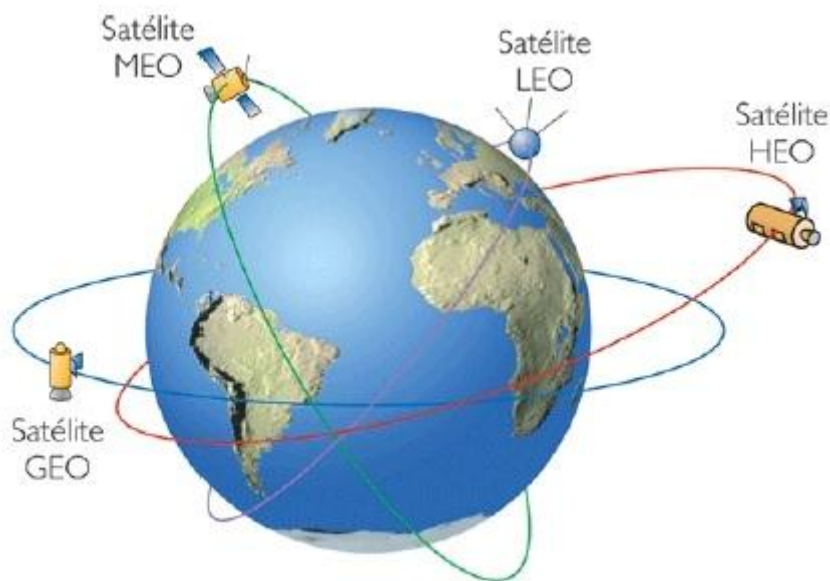


Imagen 13: Órbitas.

3.3.3 Órbita GEO / Órbita LEO.

Una órbita geoestacionaria o órbita GEO es una órbita geosíncrona –es decir, tiene el mismo período orbital que la Tierra– en el plano ecuatorial terrestre, con una excentricidad nula (órbita circular) y un movimiento de Oeste a Este. Desde tierra, un objeto geoestacionario parece inmóvil en el cielo y, por tanto, es la órbita de mayor interés para los operadores de satélites artificiales de comunicación y de televisión. En este tipo de órbitas la latitud del satélite es siempre cero, por lo que sólo varían en longitud.

Las órbitas geoestacionarias son útiles debido a que un satélite parece estático respecto a un punto fijo de la Tierra en rotación. El satélite orbita en la dirección de la rotación de la Tierra, a una altitud de 35.786 km. Esta altitud es significativa ya que produce un período orbital igual al período de rotación de la Tierra, conocido como día sideral. Como resultado, se puede apuntar una antena a una dirección fija y mantener un enlace permanente con el satélite. Se utiliza una órbita de transferencia geoestacionaria para trasladar un satélite desde órbita terrestre baja hasta una órbita geoestacionaria. Por estos motivos, la mayor parte de los satélites de comunicaciones y satélites de televisión operan desde órbitas geoestacionarias

Por otro lado, tenemos las órbitas de baja altura, también llamadas órbitas LEO (*Low Earth Orbit*, en inglés). Estas órbitas tienen un ángulo bajo de inclinación y están típicamente entre 200 - 2000 km sobre la superficie de la Tierra. Las órbitas más bajas que ésta no son estables y decaen rápidamente debido al rozamiento con la atmósfera, en cambio, las más altas (HEO, MEO) están sujetas a averías electrónicas rápidamente debido a la radiación intensa y a la acumulación de carga eléctrica.

Muchos satélites están puestos en órbitas LEO. La principal excepción son los satélites de comunicación, que requieren órbita geoestacionaria. Es necesaria menos energía para situar un satélite en órbita terrestre baja y además el satélite necesita transmisores menos potentes para transferencia de datos, por lo que la órbita LEO también se usa para algunas aplicaciones de comunicación. Dado que estas órbitas no son geoestacionarias, se requiere una red de satélites –constelaciones de satélites– para suministrar cobertura continua. Las órbitas bajas también ayudan a satélites de teledetección gracias al nivel de detalle añadido que puede ser obtenido.

	Satélite GEO	Satélite LEO
Número de satélites	3 ó 4	10n ($4 \leq n \leq 10$)
Retardo	250 ms	pocos ms
Desviación Doppler	0	grande
Elevación	10-90°	10-90°
Satélite	grande y complejo	pequeño
Segmento terreno	grande, de operación sencilla	pequeño, de operación compleja
Cobertura	no en los polos	total
Tiempo transf. Intersatélites	horas	minutos
Coste	más bajo	más alto

Tabla 6: Comparación satélite GEO/satélite LEO.

3.4 Análisis del movimiento orbital.

Existen distintas teorías para analizar el movimiento orbital, son las siguientes:

- Teoría de Newton.
- Teoría relativista de Einstein.

- Teorías keplerianas.

3.4.1 Teoría de Newton.

Para un sistema de dos cuerpos que se influyen únicamente por la gravedad, las órbitas se pueden calcular utilizando las leyes del movimiento de Newton y la ley de la gravitación universal. Es decir, la suma de las fuerzas será igual a la masa por su aceleración y la gravedad es proporcional a la masa e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (despreciando las dimensiones y forma de los cuerpos).

Para realizar los cálculos, se debe definir el movimiento en un sistema de coordenadas situado en el centro de gravedad del sistema. Si uno de los cuerpos es mucho más grande que el otro, el centro de gravedad coincidirá con el centro del cuerpo más pesado, por lo que el cuerpo ligero orbitará alrededor del pesado.

La teoría de Newton enuncia que la órbita de un cuerpo es una sección cónica. La órbita puede ser abierta, si el objeto nunca regresa, o cerrada, si regresa, dependiendo de la suma de energía cinética y potencial del sistema. En el caso de una órbita abierta, la velocidad en cualquier posición de la órbita es al menos la de la velocidad de escape para esa posición; en una órbita cerrada, es siempre menor. Una órbita abierta tiene forma de hipérbola si la velocidad es mayor que la velocidad de escape, o de parábola, si la velocidad es igual a la velocidad de escape.

Una órbita cerrada tiene forma de elipse, excepto cuando el cuerpo orbitante se encuentra a la misma distancia del centro, que tendrá forma de círculo. El punto en el cual el cuerpo se encuentra más cerca de la Tierra se denomina perigeo, o periastro cuando orbita alrededor de otro cuerpo distinto a la Tierra. Análogamente, el punto en el cual el cuerpo se encuentra más alejado de la Tierra se llama apogeo, o apoastro si no orbita sobre la Tierra. La línea que va desde el periastro al apoastro es la línea de los ápsides y representa el eje mayor de la elipse.

Los cuerpos que orbitan en órbitas cerradas repiten su trayectoria en un período constante. Este movimiento es descrito por las leyes de Kepler, que se pueden derivar matemáticamente de las Leyes de Newton. Estas leyes son:

- La órbita de un planeta alrededor del Sol es una elipse, con el Sol en uno de sus focos. Por tanto, la órbita yace en un plano, denominado plano orbital. El punto de la órbita más cercano al cuerpo atrayente es el periastro. El punto más alejado se denomina apoastro. Existen nombres específicos para cuerpos determinados: los objetos que orbitan alrededor del Sol tienen perihelio y afelio, los objetos que orbitan alrededor de la Tierra tienen perigeo y apogeo.
- Mientras los planetas se mueven alrededor de su órbita durante un periodo de tiempo fijo, la línea desde el Sol al planeta barre un área constante del plano orbital, independientemente de la parte de la órbita en la que se encuentre el planeta en ese período. Esto significa que un planeta se mueve más rápido cuando se acerca a su perihelio que cuando lo hace a su afelio, debido a que en la distancia menor se necesita barrer un arco mayor para cubrir el mismo área.

- Para cada planeta, la relación entre el cubo de su semieje mayor con respecto al cuadrado del período es un valor constante.

Excepto para casos especiales como los puntos de Lagrange, no existe un método para solucionar las ecuaciones de movimiento para un sistema de cuatro o más cuerpos. Las soluciones para dos cuerpos se publicaron en *"Philosophiae Naturalis Principia Mathematica"* de I. Newton en 1687. En 1912, Karl F. Sundman desarrolló una serie infinita convergente que soluciona el problema con tres cuerpos, pero es ineficiente. En su lugar, las órbitas se han de aproximar, y para ello existen dos formas.

La primera aproximación consiste en tomar el movimiento elíptico puro como base y añadirle perturbaciones –de esta forma se tiene en cuenta la influencia gravitacional de otros cuerpos–. Este método es conveniente para calcular las posiciones de objetos astronómicos, ya que las ecuaciones de movimiento de la Luna, los planetas y otros cuerpos se conocen con gran precisión y se utilizan para generar tablas para la navegación astronómica.

Para propósitos científicos o de una misión espacial, se utilizan ecuaciones diferenciales. Según las Leyes de Newton, la suma de todas las fuerzas es igual a la masa por su aceleración. Por tanto, las aceleraciones se pueden expresar en términos de posición y así, los términos de las perturbaciones pueden describirse de una manera más sencilla. La predicción de las posiciones futuras y velocidades desde los términos iniciales se soluciona con un problema de valor inicial. Los métodos numéricos calculan las posiciones y velocidades de los objetos para un tiempo muy pequeño, y luego se van repitiéndolo. Sin embargo, existen errores aritméticos (debido a la limitada precisión de las herramientas) que se van acumulando, por lo que se limita la precisión de esta aproximación.

Las simulaciones de diferenciales con grandes cantidades de objetos realizan los cálculos de forma jerárquica entre los centros de masas.

Para analizar el movimiento de un cuerpo bajo la influencia de una fuerza que se dirige desde un punto fijo, se deben utilizar coordenadas polares, de tal forma que el origen de coordenadas coincida con el centro de la fuerza. En el sistema de coordenadas polares, las componentes radial y transversal son respectivamente:

$$a_r = \frac{d^2r}{dt^2} - r \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 \quad (17)$$

$$a_\theta = \frac{1}{r} \frac{d}{dt} \left(r^2 \frac{d\theta}{dt} \right) \quad (18)$$

Como la fuerza es completamente radial y la aceleración es proporcional a la fuerza, la aceleración transversal es igual a cero:

$$\frac{d}{dt}\left(r^2 \frac{d\theta}{dt}\right) = 0 \quad (19)$$

Donde r y θ hacen referencia al sistema de coordenadas polares.

Si se realiza la integral, se obtiene lo siguiente.

$$r^2 \frac{d\theta}{dt} = \text{const} \quad (20)$$

(La ecuación 20 es una prueba teórica de la segunda ley de Kepler).

La constante de integración es el momento angular por unidad de masa, por lo que la ecuación anterior queda de la siguiente forma:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{l}{r^2} = lu^2 \quad (21)$$

Donde $u = \frac{1}{r}$ medido en $1/m$ y l es el momento angular, medido en $kg \, m^2/s$.

La fuerza radial $f(r)$ por unidad es a_r . Si se elimina la variable temporal del componente radial de la ecuación, se obtiene:

$$\frac{d^2u}{d\theta^2} + u = -\frac{f(1/u)}{l^2u^2} \quad (22)$$

En el caso de la gravedad, la ley universal de gravitación de Newton afirma que la fuerza es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia:

$$f(1/u) = a_r = \frac{-GM}{r^2} = -GMu^2 \quad (23)$$

Donde G es la constante de gravitación universal (en Nm^2/kg^2), m la masa del cuerpo orbitante en kg y M la masa del cuerpo central en kg . Si se sustituye en la ecuación anterior se obtiene:

$$\frac{d^2u}{d\theta^2} + u = \frac{GM}{l^2} \quad (24)$$

Para la fuerza gravitacional, el término de la derecha de la ecuación se convierte en una constante y la ecuación es como una ecuación armónica. La ecuación para la órbita descrita por la partícula es:

$$r = \frac{1}{u} = \frac{l^2/GM}{1 + e \cos(\theta - \theta_0)} \quad (25)$$

Donde p , e y θ_0 son constantes de la integración,

$$p = \frac{l^2}{GM} = a(1 - e^2) \quad (26)$$

En general, se puede reconocer como la ecuación de una cónica en coordenadas polares (r, θ) .

3.4.2 Teoría relativista de Einstein

La teoría de la relatividad especial está en contradicción con la teoría newtoniana, ya que esta última ocurre a distancia instantánea. Por esto, Einstein buscó una teoría más general, dando lugar a la teoría de la relatividad general.

Esta teoría incorpora una descripción relativista del campo gravitatorio. En esta teoría, la presencia de una masa en el espacio curva el espacio-tiempo de tal manera que la geometría deja de ser euclídea. Las órbitas planetarias no son estrictamente secciones cónicas –como enuncia la teoría de Newton– sino curvas geodésicas (líneas de mínima curvatura) sobre la geometría curva del espacio-tiempo.

Esta teoría es no lineal y resulta complicado hacer cálculos para un problema de dos cuerpos de masas iguales. Sin embargo, para sistemas planetarios como el sistema solar, en que el astro central es mucho más grande que el resto de planetas, se puede estimar la curvatura del espacio-tiempo debida únicamente al sol (despreciando la del resto de planetas) y asumir que los planetas menores se mueven según curvas geodésicas.

Los resultados obtenidos por la teoría de Einstein son muy cercanos a la teoría newtoniana (por lo que se usa la teoría newtoniana, ya que es más simple). Sin embargo, la teoría newtoniana no puede explicar algunos hechos que sí puede hacer la teoría de Einstein, entre los que se encuentra el efecto de avance del perihelio del planeta Mercurio.

En el caso relativista, el problema de dos cuerpos se puede resolver usando la solución de Schwarzschild (ver anexos) para el campo gravitatorio creado por un cuerpo con simetría esférica. La órbita planetaria en el espacio-tiempo es una curva geodésica que sigue la métrica de Schwarzschild. Esta situación es equivalente a que la partícula notara una aceleración radial efectiva dada por:

$$a_r = GM \left(\frac{1}{r^2} + \frac{3l^1}{c^2 r^4} \right) \quad (27)$$

donde:

- G y c son la constante de la gravitación universal (en Nm^2/kg^2) y velocidad de la luz (m/s).
- r , coordenada radial de Schwarzschild (m).
- l , momento angular orbital del planeta por unidad de masa ($\text{kg m}^2/\text{s}$).

Las constantes del movimiento asociadas a la energía y el momento angular son:

$$\frac{1}{2}(\dot{r}^2 + r^2\dot{\theta}^2) - GM\left(\frac{1}{r^2} + \frac{3l^1}{c^2 r^4}\right) = E, r^2\dot{\theta} = l \quad (28)$$

Donde G, l, c y r se miden en las mismas unidades que se ha indicado anteriormente.

La ecuación del movimiento, haciendo el cambio $u = \frac{1}{r}$, queda como:

$$\left(\frac{du}{d\theta}\right)^2 = \frac{2GM}{l^2}u - u^2 + \frac{2GM}{c^2}u^3 + \frac{2E}{l^2} \quad (29)$$

Para todos los planetas, el tercer término del segundo miembro es pequeño en comparación con el resto. Para mostrar esto se introduce el parámetro $\epsilon = 2\left(\frac{GM}{cl}\right)^2$ y se hace un nuevo cambio de variable $\bar{u} = ul^2/GM$ (medida en m/s N) con lo que la ecuación del movimiento se puede reescribir de la siguiente forma.

$$\left(\frac{d\bar{u}}{d\theta}\right)^2 = 2\bar{u} - \bar{u}^2 + \epsilon\bar{u}^3 - \beta =: f(\bar{u}) \quad (30)$$

donde:

$$\beta := -\frac{2El^2}{G^2M^2} = 1 - e^2 \quad (31)$$

Buscando las raíces de la función $f(\bar{u})$, se llega a:

$$\begin{cases} \bar{u}_1 = 1 - e - \frac{\epsilon}{2e}(1 - e)^3 + O(\epsilon^2) \\ \bar{u}_2 = 1 + e + \frac{\epsilon}{2e}(1 - e)^3 + O(\epsilon^2) \\ \bar{u}_3 = \frac{1}{\alpha} - 2 + O(\epsilon) \end{cases} \quad (32)$$

Para las órbitas planetarias estables se tiene $\bar{u}_1 < \bar{u} < \bar{u}_2$ (el caso $u > \bar{u}_3$ queda excluido ya que implica que la partícula cae sobre el sol $\bar{u} \rightarrow \infty$). La solución de la ecuación viene dada por.

$$\epsilon^{1/2}\theta = \int \frac{dv}{\sqrt{(v - \bar{u}_1)(v - \bar{u}_2)(v - \bar{u}_3)}} \quad (33)$$

Esta integral puede reducirse a una integral elíptica mediante el cambio de variable $v = \bar{u}_1 + 1/t^2$, quedando como:

$$\epsilon^{1/2}\theta = -2ab \int \frac{dt}{\sqrt{(t^2 - a^2)(t^2 - b^2)}} \quad (34)$$

donde:

$$a^2 = \frac{1}{\bar{u}_2 - \bar{u}_1}, b^2 = 1/(\bar{u}_3 - \bar{u}_1) \quad (35)$$

Usando una de las funciones elípticas de Jacobi se puede integrar como:

$$\epsilon^{1/2}\theta = bns^{-1}\left(\frac{t}{a}\right) \quad (36)$$

con módulo dado por $k = \sqrt{b/a}$, usando este resultado para la ecuación de la órbita se tiene:

$$\bar{u} = \bar{u}_1 + (\bar{u}_2 - \bar{u}_1)sn^2\left(\frac{1}{2}\sqrt{\epsilon(\bar{u}_3 - \bar{u}_1)}\theta\right) \rightarrow \frac{1}{r} = \frac{GM}{l^2}(A + Bsn^2(\eta\theta)) \quad (37)$$

donde:

$$\begin{aligned} A &= 1 - e - \frac{\epsilon}{2e}(1 - e)^3 + O(\epsilon^2) \\ B &= 2e + \epsilon(3e + \frac{1}{e}) + O(\epsilon^2) \\ \eta &= \frac{1}{2} - \frac{(3 - e)\epsilon}{4} + O(\epsilon^2) \\ k^2 &= 2e\epsilon + O(\epsilon^2) \end{aligned} \quad (38)$$

Donde k es el módulo de la función elíptica de Jacobi para la órbita.

Si $\epsilon = 0$, entonces $A = 1 - e$, $B = 2e$, $\eta = \frac{1}{2}$, $k = 0$ y en ese caso la órbita queda reducida al caso newtoniano clásico.

$$\frac{l^2}{GMr} = 1 - e \cos \theta \quad (39)$$

Que es una elipse de excentricidad e. Sin embargo, la órbita no es periódica, sino que es una cuasi-elipse que gira alrededor del sol. Este fenómeno es conocido como avance del perihelio. El perihelio aparece en $\theta = K/\eta$ y el siguiente valor para el que se da es $\theta = 3K/\eta$ (donde K es un cuarto del período, dado por la integral elíptica de primera especie completa), por lo tanto entre dos perihelios el ángulo girado no es 2π sino una cantidad ligeramente mayor:

$$\frac{2K}{\eta} = 2\pi + \frac{\pi(1 + \frac{1}{4}k^2 + \dots)}{\frac{1}{2} - \frac{1}{4}(3 - \epsilon)} \approx 2\pi + 3\pi\epsilon \quad (40)$$

Para Mercurio con $\epsilon = 5.09 \cdot 10^{-8}$ el avance del perihelio predicho es de $41.07''/\text{siglo}$ (siendo su período de 88 días), que es prácticamente el valor experimental $42.95''/\text{siglo}$. Esto constituyó uno de los éxitos iniciales de la teoría y provocó una gran aceptación.

3.4.3 Leyes de Kepler. Enunciado y demostración.

Johannes Kepler, fue un astrónomo y matemático alemán; conocido por sus leyes sobre el movimiento de los planetas en su órbita alrededor del Sol. Las tres leyes de Kepler sobre el movimiento de los planetas son las siguientes:

- La órbita de cada planeta es una elipse con el Sol en uno de sus focos. –Primera ley de Kepler, enunciada en 1609–.
- Una línea que una al Sol con un planeta barre áreas iguales en tiempos iguales (Ley de Áreas) –Segunda ley de Kepler, enunciada en 1609–.
- El cuadrado del período orbital de cada planeta es directamente proporcional al cubo del semieje mayor de la elipse de la órbita del planeta. –Tercera ley de Kepler, enunciada en 1618–.

Como el Sol es mucho más grande que los planetas, se puede considerar el centro de masas de un sistema formado por Sol-planeta centrado en el Sol y estando éste inmóvil. Como consecuencia de eso, el movimiento del planeta es una cónica con el Sol en uno de sus focos. Adicionalmente, se sabe que las órbitas que describen los planetas son cerradas. Por tanto, como la única cónica cerrada es la elipse, se deduce que la órbita de cada planeta es una elipse.

Para demostrar la segunda ley de Kepler se debe definir un nuevo sistema de referencia en el plano orbital, con origen cada punto de la trayectoria $\vec{r}(t)$, de tal forma que el eje e_r es paralelo a r , y el otro eje, e_θ , define la horizontal local y está orientado a la izquierda respecto a e_r , tal y como se observa en la siguiente imagen:

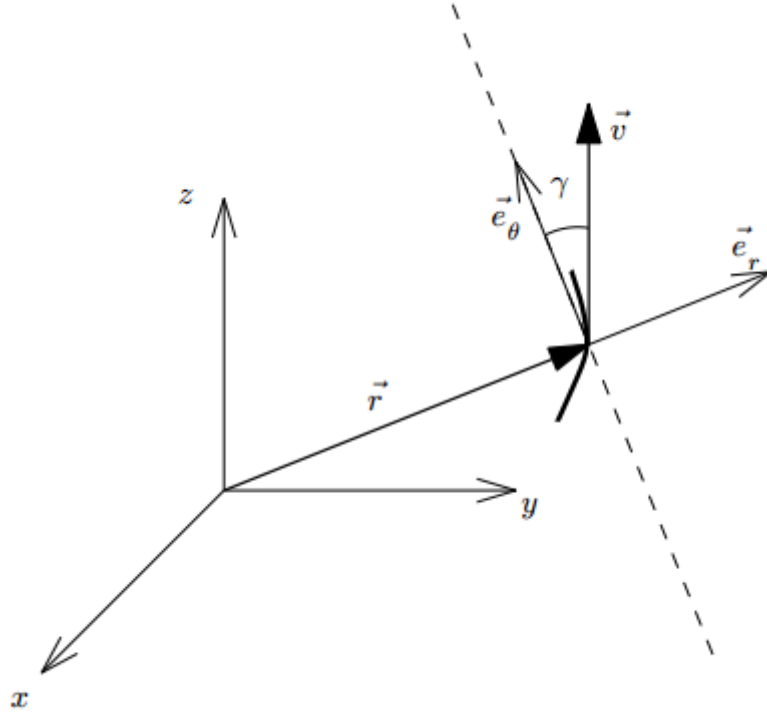


Imagen 14: Sistema de referencia en el plano orbital.

(<http://www.aero.us.es/astro/files1314/t2.pdf>)

El ángulo creado entre los vectores \vec{v} y \vec{e}_θ es γ , conocido como el ángulo de trayectoria (*flight path angle*). Se puede escribir por tanto, que $\vec{r} = r \vec{e}_r$ y $\vec{v} = v \sin \gamma \vec{e}_r + v \cos \gamma \vec{e}_\theta$.

En primer lugar, se calcula $\vec{h} = \vec{r} \times \vec{v}$ usando los ejes locales:

$$\vec{h} = vr \sin \gamma (\vec{e}_\theta \times \vec{e}_r) + vr \cos \gamma (\vec{e}_r \times \vec{e}_\theta) = vr \cos \gamma \vec{e}_z \quad (41)$$

Por otro lado,

$$\vec{v} = \dot{\vec{r}} = \dot{r} \vec{e}_r + r \dot{\vec{e}}_r = \dot{r} \vec{e}_r + r \dot{\theta} \vec{e}_\theta \quad (42)$$

Si se repiten los cálculos se obtiene

$$\vec{h} = r^2 \dot{\theta} \vec{e}_z \quad (43)$$

Por tanto,

$$h = r^2 \dot{\theta} = vr \cos \gamma = cte \quad (44)$$

El área se define como

$$A(t) = \int_0^{\theta(t)} \int_0^{r(\varphi)} \rho d\rho d\varphi = \int_0^{\theta(t)} \frac{r(\varphi)^2}{2} d\varphi \quad (45)$$

Por tanto,

$$\frac{d}{dt}A(t) = \frac{r^2 \dot{\theta}}{2} = \frac{h}{2} = cte \quad (46)$$

Es decir, la velocidad es constante, y esta ley de Kepler se cumple para todas las cónicas.

En el caso de la tercera ley de Kepler –el cuadrado del periodo orbital de cada planeta es directamente proporcional al cubo del semieje mayor de la elipse de la órbita del planeta– el período es:

$$T = \frac{A}{\dot{A}} = \frac{\pi ab}{h/2} = \frac{2\pi ab}{h} \quad (47)$$

De la definición de la elipse se tiene que $b = a \sqrt{1 - e^2}$

Por otro lado, $p = \frac{h^2}{\mu} \rightarrow h = \sqrt{p\mu}$ y de la definición de p, $h = \sqrt{a(1 - e^2)\mu}$

Por tanto,

$$T = \frac{2\pi a^2 \sqrt{1 - e^2}}{\sqrt{a(1 - e^2)\mu}} = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu}} \quad (48)$$

Finalmente llegamos a $T^2 = \frac{4\pi^2}{\mu} a^3$, quedando así la 3ª ley de Kepler demostrada

3.5 Cobertura.

Se han de diferenciar dos tipos de cobertura: cobertura geométrica y cobertura radioeléctrica.

El primer caso hace referencia a la superficie de la Tierra que se ve desde el satélite en forma de un cono tangente a la Tierra, tal y como se puede ver representado en la siguiente imagen:

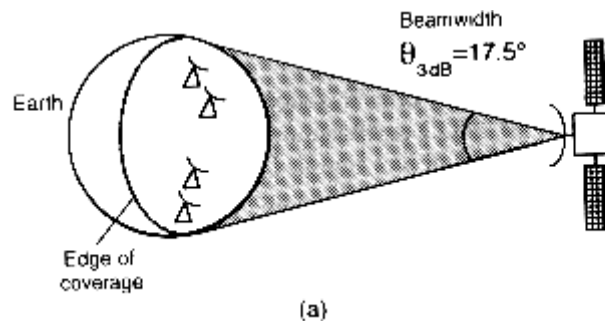


Imagen 15: Cobertura geométrica de un satélite.

(http://www.upv.es/satelite/trabajos/Grupo9_99.00/mara151.gif)

El cálculo de esta cobertura depende tanto de la distancia del satélite a la estación terrena, como de los ángulos de elevación y azimut de la estación terrena.

El cálculo de la distancia del satélite a la estación terrena se puede obtener mediante la siguiente fórmula –para el caso de un satélite GEO–:

$$d = \sqrt{(Re + h)^2 + Re^2 - 2Re(Re + h)\cos\varphi\cos\lambda} \quad (49)$$

Donde Re es el radio equivalente de la tierra en metros, h la altura del satélite en metros, φ la longitud relativa y λ la latitud relativa (ambas en grados). Como el satélite es GEO, su latitud será cero, por tanto, la latitud relativa que se utilizará corresponderá a la latitud de la estación terrena. En el caso de la longitud relativa, la longitud del satélite es distinta de cero, por lo que es necesario conocer la orientación de las longitudes. En caso de que el satélite y la estación terrena estén orientados de la misma manera (ambos con orientación este u oeste), la longitud relativa será el valor absoluto de la resta de los valores. En caso de que la orientación sea distinta (uno situado en el este y otro en el oeste, o viceversa), la longitud relativa será la suma de los valores de las longitudes.

Por último es necesario definir el ángulo de elevación y el ángulo de azimut.

El ángulo de elevación (EI) es el ángulo que existe desde el plano horizontal hasta la dirección de una onda radiada por el satélite. A medida que el ángulo de elevación es menor, la distancia que recorre la onda es mayor. Como todas las ondas sufren absorción y pueden tener pérdidas de propagación que dependen de la distancia, se considera que el ángulo de elevación mínimo para obtener una calidad aceptable es de 5°.

El ángulo de azimut (A) se mide en el sentido de las agujas del reloj entre la línea que une la estación terrena con el norte geográfico y la proyección horizontal de la línea de máxima radiación de la antena que debe apuntar al satélite.

Se pueden ver en la siguiente imagen:

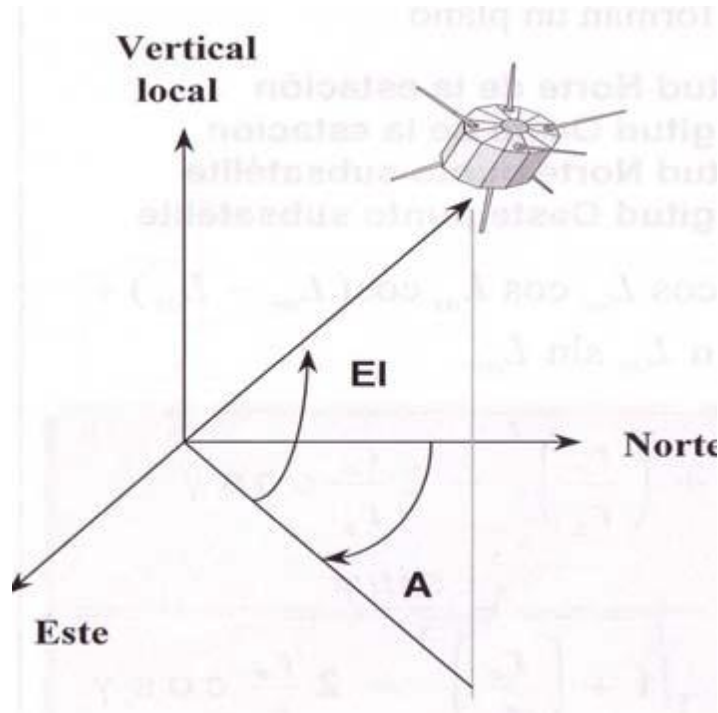


Imagen 16: Ángulo de elevación y ángulo de azimut

Tanto el ángulo de elevación como el de azimut dependen de las coordenadas geográficas de la estación terrena y de la posición orbital del satélite.

Las fórmulas para calcular el ángulo de elevación y el ángulo de azimut respectivamente son las siguientes:

$$\theta = \tan^{-1} \left\{ \frac{(\cos l)(\cos \Delta L) - \frac{Re}{h}}{\sin[\cos^{-1}(\cos l \cos \Delta L)]} \right\} \quad (50)$$

Donde l es la latitud de la estación terrena en grados, ΔL es la longitud relativa en grados, Re el radio equivalente de la tierra en metros y h la altura del satélite en metros.

$$\phi' = \tan^{-1} \left[\frac{\tan \Delta L}{\sin l} \right] \quad (51)$$

Finalmente, dependiendo de la ubicación de la estación terrena, el ángulo de azimut ϕ es:

$\phi = 180^\circ - \phi'$, si la estación terrena está en el hemisferio norte y al oeste del satélite.

$\phi = 180 + \phi'$, si la estación terrena está en el hemisferio norte y al este del satélite.

$\phi = \phi'$, si la estación terrena está en el hemisferio sur y al oeste del satélite.

$\phi = 360 - \phi'$, si la estación terrena está en el hemisferio sur y al este del satélite.

3.6 Acceso múltiple.

Como un único transpondedor es el encargado de manejar las transmisiones de un variado número de estaciones terrestres, es necesario utilizar técnicas que permitan el acceso múltiple al transpondedor.

Los recursos del transpondedor pueden ser compartidos por división del tiempo o de frecuencia, o mediante el uso de códigos no interferentes.

Existen diferentes técnicas de acceso múltiple, de las cuales destacan:

- FDMA: *Frequency Division Multiple Access*.
- TDMA: *Time Division Multiple Access*.
- CDMA: *Code Division Multiple Access*.

3.6.1 FDMA. Acceso multiple por division de frecuencia.

En FDMA, los usuarios comparten los recursos del transpondedor por la asignación previa de canales individuales. Esta técnica es aplicable para servicios analógicos y digitales. Los transpondedores operan en modo lineal para evitar no linealidades que puedan causar intermodulación e interferencias a los usuarios.

En FDMA se distribuye el ancho de banda entre las estaciones participantes. Cada estación transmisora tiene portadoras diferentes y bandas de guardia, por lo que existe una interferencia mutua pequeña.

En el satélite se realiza la conversión de frecuencias en sub-bandas y la amplificación. Es un inconveniente ya que aparece el problema del ruido de intermodulación en el amplificador.

Desde el satélite se difunde toda la banda. La estación receptora suele ser de banda ancha, y recibe todo el ancho de banda y sintoniza las portadoras destinadas a ella.

También puede haber estaciones receptoras de banda estrecha, las cuales sintonizan una única portadora monocal. Se utiliza como variante:

- SCPC (*Single Channel per Carrier*): un único canal por portadora.
- DAMA (*Demand Assigned Multiple Access*): asignación de canales bajo demanda.

3.6.2 TDMA. Acceso múltiple por división en el tiempo.

TDMA es una técnica de acceso múltiple que distribuye las unidades de información en ranuras alternas de tiempo, dando acceso a un número reducido de frecuencias. Esta técnica divide un canal de frecuencias en varias ranuras de tiempo. A cada usuario se le asigna una ranura de tiempo específica para realizar la transmisión. Esto permite que diferentes usuarios utilicen una misma banda de frecuencia al mismo tiempo, sin interferencias entre ellos. En TDMA la información debe ser digital. Para evitar colisiones, es necesario regular el acceso. Para ello, se utilizan tiempos de guarda, ya que los tiempos de llegada al satélite no son iguales.

En esta técnica a cada usuario se le asigna todo el ancho de banda del canal durante un corto período de tiempo. Ese canal posteriormente estará disponible para otro usuario, y así sucesivamente.

Esta técnica de acceso múltiple solo se produce en **sentido ascendente**.

El atractivo de esta técnica es que el transpondedor opera a altos niveles de potencia (y con una alta eficiencia), e incluso cuando está cerca de la saturación no se provoca interferencia a otros usuarios. TDMA está destinado para modelos de modulación digital de alta velocidad de transmisión. El TDMA convencional tiene una capacidad –generalmente 120 Mbps– que está lejos de la capacidad de los sistemas VSAT. Sin embargo, existen transpondedores que operan en el rango de 32 a 128 kbps que son utilizados en algunos sistemas VSAT.

3.6.3 CDMA. Acceso múltiple por división de código.

CDMA se basa en las propiedades de secuencias directas de espectro ensanchado. El espectro ensanchado es una forma de transmisión en la cual la señal transmitida ocupa un ancho de banda superior al de los datos de la señal. Esta difusión se logra combinando la señal de datos con una señal con alto *bit-rate*, que es independiente de los datos.

La recepción al final del enlace se consigue mezclando la señal compuesta de datos y código con una réplica sincronizada del código para obtener los datos. Los códigos utilizados para esto tienen como característica que permiten que cualquier código individual sea distinguido de los otros. Esta es la propiedad que permite que muchas señales compuestas compartan una banda común de frecuencia.

Existen restricciones prácticas en el uso de espectro ensanchado, por lo que solamente se utiliza para el rechazo de interferencias o por razones de seguridad en sistemas militares.

3.6.4 Comparación.

	Ventajas	Inconvenientes
FDMA	✓ Fácil realización	✗ Ruido de intermodulación
	✓ No requiere temporización	✗ Interferencia entre portadoras
		✗ Reducción del punto de trabajo del amplificador
TDMA	✓ Toda la potencia disponible	✗ Temporización estricta
	✓ Flexible al tráfico	✗ Retardo añadido
	✓ Digital: control de errores	

Tabla 7: Comparación técnicas acceso múltiple.

3.7 Multiplexación.

La multiplexación es el proceso que permite la transmisión de la información procedente de varias fuentes sobre un mismo canal físico.

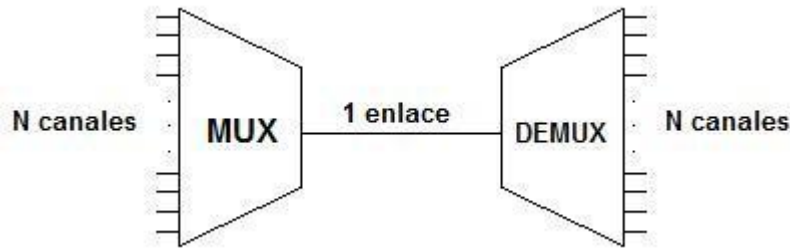


Imagen 17: Multiplexación.

(http://img.photobucket.com/albums/v725/feadraug/vidateleco/MUX_000.jpg)

El objetivo de la multiplexación es compartir la capacidad de transmisión de datos sobre un mismo enlace para así aumentar la eficiencia. Por otro lado, también tiene como objetivo minimizar la cantidad de enlaces físicos requeridos y maximizar el uso del ancho de banda de los medios.

Existen diferentes métodos de multiplexación:

- Multiplexación por división de tiempo, TDM.
- Multiplexación por división de frecuencia, FDM.
- Multiplexación por división de código, CDM.
- Multiplexación por división de onda, WDM.

3.7.1 TDM. Multiplexación por división en el tiempo.

Este tipo de multiplexación es el más utilizado en los sistemas de transmisión digitales. En este tipo, el ancho de banda total del medio de transmisión es asignado a cada canal durante un intervalo de tiempo. Con las técnicas de multiplexación por división en el tiempo se pretende conseguir un mayor rendimiento en la transmisión, ya que en cada transmisión se pueden enviar varias comunicaciones simultáneas. Se suele emplear cuando la tasa de datos de transmisión es mayor que la tasa de datos requerida por los dispositivos emisores y receptores.

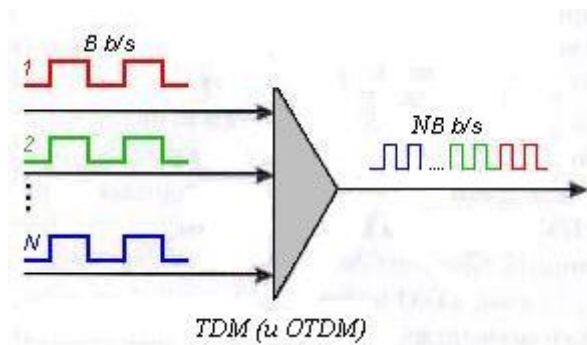


Imagen 18: Multiplexación por división en el tiempo, TDM.

(http://nemesiis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema4/imagenes_tema4_2/image001.jpg)

La multiplexación en el dominio del tiempo puede ser síncrona y asíncrona.

3.7.2 FDM. Multiplexación por división en frecuencia.

En esta técnica de multiplexación, diferentes señales se combinan para ser transmitidas en un único canal de comunicaciones. A cada señal se le asigna una frecuencia diferente (subcanal) dentro del canal principal.

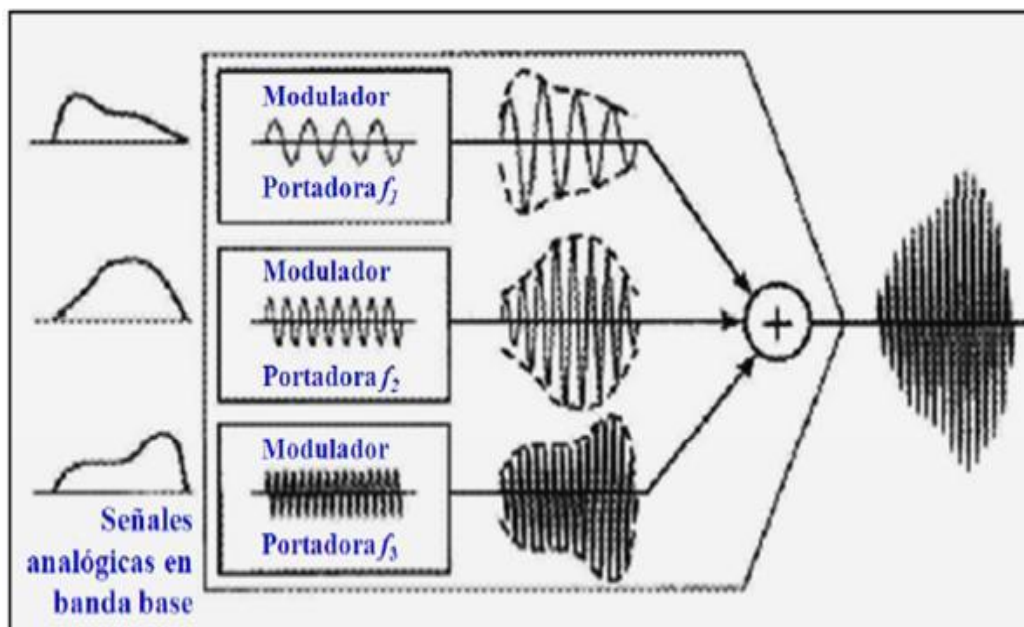


Imagen 19: Multiplexación por división en frecuencia, FDM.
(<http://comunicationsone.files.wordpress.com/2011/01/11.jpg>)

Como se puede observar en la imagen, se tienen diferentes señales a diferentes frecuencias (portadoras), las cuales se combinan, generando una única señal que es la que se enviará a través del canal.

Cuando se utiliza FDM en una red de comunicaciones, la principal característica es que se envía y se recibe cada señal a la máxima velocidad en todo momento. Sin embargo, si deben enviarse muchas señales a lo largo de una sola línea, el ancho de banda necesario es grande y es más complicado asegurarse de que el sistema funcionará correctamente.

3.8 Sistemas VSAT.

3.8.1 Introducción: definición y características.

Ya se ha visto la importancia y las características de las comunicaciones vía satélite. En el caso que se estudia en este Trabajo Fin de Grado, el sistema que se utiliza es un sistema VSAT, y en concreto, ¿por qué VSAT? ¿Qué ventajas ofrecen frente a otros sistemas?

El término VSAT –*Very Small Aperture Terminal*– hace referencia a cualquier sistema con pequeños terminales, con independencia de su aplicación. Por ejemplo, independientemente

de si forma parte de una red de negocios dedicada, o de una red de datos basada en televisión digital terrestre o una aplicación militar o civil.

Mientras que la mayoría de sistemas VSAT comerciales han sido diseñados para transportar datos, el tráfico subyacente puede ser voz digitalizada, datos de vídeo o cualquier otro tipo de dato dentro de la capacidad del sistema.

El término VSAT generalmente hace referencia a sistemas de instalación fija.

Otra definición es la siguiente: se considera terminal VSAT a aquellas antenas que no sobrepasan los 2 o 3 metros de diámetro. La diferencia con otras antenas, es que la señal que radian no puede alcanzar directamente a otros terminales VSAT, por lo que la comunicación se realiza de forma indirecta, a través de satélites geoestacionarios.

Los terminales VSAT normalmente operan junto a estaciones HUBs terrestres de larga apertura y capaces de proporcionar un amplio rango de servicios integrados de información y de telecomunicación.

Las ventajas que presentan las redes VSAT frente a otras redes son las siguientes:

- Accesibilidad a todos los puntos geográficos.
- Gran calidad y disponibilidad.
- Facilidad de instalación y crecimiento de red.
- Adaptación al tipo de tráfico.
- Menores costes de realización y explotación de la red.

Por las ventajas que ofrecen los terminales VSAT, así como por el precio económico de los equipos, estos sistemas se consideran como una buena solución a los problemas de comunicación en zonas en las que cubrir todo con otros medios no sería rentable.

De todas las bandas de frecuencias mencionadas en el apartado “3.2. Definición, características, servicios.” los sistemas VSAT comerciales utilizan satélites cuyos transpondedores operan en la banda C (subida 6 GHz, bajada 4 GHz) o banda Ku en el caso de servicio fijo (FSS). En caso de BSS (*Broadcast Satellite Service*) los sistemas VSAT comerciales utilizan la banda Ku de frecuencia. También hay una asignación para servicios fijos en la banda Ka. Por último la banda L se utiliza por Inmarsat para la provisión de servicios móviles.

3.8.2 Composición: Segmento espacial y segmento terreno.

Los satélites utilizados para comunicaciones están todos ubicados en una órbita geoestacionaria, localizada en un arco 36000 km por encima del ecuador.

El segmento espacial es suministrado por aquellas organizaciones que hayan adquirido satélites y por aquellas que exploten estos satélites de manera comercial. Inicialmente, estas organizaciones tenían un ámbito internacional, por ejemplo Intelsat ofrecía capacidad para satélites en banda C y en banda Ku, pero los requisitos para los satélites de comunicaciones han aumentado, y los sistemas regionales y domésticos han entrado en escena.

Para seleccionar el segmento espacial es importante asegurarse de que las características del transpondedor del satélite son adecuadas y compatibles con la operación de pequeños terminales.

En el caso del segmento terreno, los principales elementos en una red VSAT son el terminal HUB y el terminal VSAT. Ambos realizan funciones similares en términos de manejo de señales, la diferencia está en los niveles de potencia transmitida y el rendimiento en la recepción.

El rendimiento de la antena se especifica con la PIRE –Potencia Isotrópica Radiada Equivalente– en la transmisión y la figura de mérito G/T en recepción. Estos parámetros dependen del tamaño de la antena, y por lo general, cuanto más grande sea la antena mejor será el rendimiento del sistema.

Una estación HUB puede dar soporte tanto a uno como a un diferente número de terminales VSATs que operen en un satélite dado. El concepto de HUB compartido es muy importante, ya que permite que el alto coste de un HUB sea amortizado gracias a los distintos usuarios. Un terminal HUB utilizado en banda C o banda Ku tiene una antena de 5-6 m a 11 m de diámetro.

El terminal VSAT se caracteriza por tener una antena mucho más pequeña, típicamente de menos de 2 m de diámetro. Como consecuencia de esto, el coste del terminal es menor que el del HUB. También, por eso mismo, el VSAT tiene menor ganancia de antena y transmite menos potencia que un HUB.

Los subsistemas que se utilizan en los HUBs y en los terminales VSATs son los siguientes:

- a) **Antenas:** el objetivo para el diseño de antenas en pequeños terminales es conseguir una alta eficiencia y una alta ganancia en la dirección del satélite combinado con pocos niveles de señal radiada en otras direcciones, es decir, una alta directividad en la dirección del satélite. Las configuraciones de alimentación se utilizan generalmente para evitar el bloqueo de haz, dando una alta eficiencia y con bajos niveles de lóbulos laterales. En banda Ku se utiliza polarización lineal para que así en el montaje de la antena pueda permitir rotación, y por tanto se pueda conseguir que la alimentación esté alineada con la polarización de las señales transmitidas y recibidas desde el satélite. En banda C se utiliza polarización circular. Las variedades de antenas que se utilizan para los terminales VSAT son:
 - i. **Antenas de paraboloides axisimétricas:** las mayores ventajas de esta configuración son que son antenas simples, compactas y baratas. La simetría circular del reflector da lugar a un considerable ahorro de costes en la producción de la superficie reflectante y en el montaje de la antena. La forma más simple de este tipo de antena consiste en un reflector paraboloide único con el centro de fases de la bocina localizado en el foco.

Normalmente, el uso de este tipo de antenas ha sido restringido a recepción, a aplicaciones en las que el amplificador de bajo ruido esté localizado cerca de

la bocina y en las que el rendimiento eléctrico general no sea tan crítico como en transmisión.

Las eficiencias de antena asociadas a este tipo de antenas en recepción son del rango del 60-65%.

- ii. **Antenas asimétricas:** las antenas con reflector axisimétrico se han visto favorecidas debido a su sencilla geometría, simplicidad mecánica y bajo coste. Sin embargo, para los terminales VSAT, estas ventajas se reducen y, en general, son superadas por las ventajas eléctricas que ofrecen las antenas asimétricas.

La eliminación de todos los efectos de bloqueo de apertura por la bocina y la superficie de soporte da lugar a mejores en la eficiencia de antena y en el rendimiento de los lóbulos. En este tipo de antenas se tiene una eficiencia del 70% y un nivel del lóbulo principal entre 25 y 30 dB.

El principal inconveniente es que la asimetría de la apertura da lugar a un alto lóbulo contrapolar, que, en caso de utilizar polarización lineal, es máximo en el plano perpendicular al plano de la asimetría.

Este tipo de antenas no han sido muy atractivas en el pasado debido al aumento del coste de fabricación para pequeñas cantidades en comparación con el de los sistemas simétricos. Sin embargo, el requisito de un gran número, junto con unas especificaciones de rendimiento más estrictas, ha llevado al uso generalizado de este tipo de antenas en funciones de recepción y transmisión. La mayoría de estas antenas tienen un reflector circular. Con esto se obtiene una iluminación óptima gracias a una bocina circular simétrica y se obtiene un haz secundario con el mismo ancho de haz en todos los planos. Aun así el uso de una apertura circular no es obligatorio. En otros casos se puede utilizar una apertura elíptica, cuadrada o rómbica.

- iii. **Bocinas primarias para terminales VSATS:** las bocinas primarias asociadas a las antenas axisimétricas o asimétricas para terminales VSATs simplemente combinan una bocina común con un transductor ortogonal de dos puertos para separar las funciones de transmisión y de recepción. Para alinear el vector de polarización de la antena del terminal VSAT con el transmitido por el satélite es necesario poder rotar el sistema de alimentación completo respecto al resto de la estructura de la antena.

Para aplicaciones de sólo recepción, se puede utilizar un modo dual o una bocina de Potter. Esta bocina se basa en el uso del modo TM_{11} para mejorar la simetría de la apertura excitada con el modo fundamental TE_{11} . Con este tipo de antena se obtiene un nivel de lóbulos laterales bajo, baja polarización cruzada y un verdadero centro de fases. El ancho de banda general de esta bocina dual está limitado por la necesidad de mantener una relación de fase adecuada entre los dos modos de ondas existentes en la apertura.

En el caso de antenas para transmisión y recepción, se utilizan bocinas cónicas corrugadas. Estas bocinas son capaces de proporcionar unos campos radiados con simetría circular, bajos niveles de polarización cruzada y bajos lóbulos

laterales sobre anchos de banda relativamente amplios. El modo fundamental asociado a esta estructura es el modo HE_{11} , considerado un híbrido de los modos TE_{11} y TM_{11} . Las componentes TE y TM en el modo híbrido tienen la misma frecuencia de corte y la misma velocidad de fase. Por tanto, estas componentes se mantienen en una correcta relación de fase a lo largo de la guía (independientemente de la frecuencia), y así la limitación del ancho de banda se elimina.

Para separar las funciones de recepción y transmisión se utiliza un transductor ortogonal. Este transductor es normalmente una unión entre una guía de ondas circular y una rectangular, con un corto circuito en uno de los brazos de la guía circular. El aislamiento entre los puertos transmisor y receptor es normalmente del orden de 40 dB, y puede ser mejorado mediante el uso de filtros.

Para los HUBs, las antenas varían en diámetro aproximadamente de 5 a 8 m y en la mayoría de los casos son configuraciones estándar que también se utilizan en otras aplicaciones de FSS. Por lo general, el diseño de antena utilizado es un reflector dual axisimétrico basado en el principio de Cassegrain (anexo). En términos de eficiencia de antena y nivel de lóbulos laterales, las antenas axisimétricas están inhibidas por el bloqueo existente en la apertura, debido a la alimentación o al subreflector junto a la estructura de soporte asociada. En el caso del sistema de Cassegrain, el bloqueo del subreflector puede llevar a un incremento de 5 dB al pico del lóbulo lateral. La radiación directa desde la bocina primaria que no está interceptada por el subreflector también da lugar a una degradación del lóbulo lateral de la antena. Esta degradación se puede minimizar de dos formas: asegurando que la radiación asociada a la bocina tenga en sí misma lóbulos laterales bajos y, en segundo lugar, incrementando el porcentaje de energía interceptada por el subreflector. Mientras que el primer caso se puede satisfacer simplemente utilizando una bocina corrugada o un modo dual, el segundo puede llevar a una reducción de la eficiencia de la antena, debido al incremento de la distribución de alimentación cónica en la apertura de la antena. Para otras aplicaciones, es más conveniente utilizar una antena dual basada en el principio de Gregorian (anexo). Con este sistema, se consigue una eficiencia de antena de al menos el 70%.

El resto de subsistemas de los HUBs y terminales VSAT son:

- b) Amplificadores de alta potencia:** estos amplificadores generalmente se usan en los HUBs, ya que pueden dar una potencia de salida de hasta varios kilovatios y tienen la capacidad de ser sintonizados a través del enlace de subida de un satélite.
- c) Amplificadores de potencia de estado sólido:** las mejoras en la industria de los semiconductores han producido que estos amplificadores proporcionen una potencia de salida alrededor a 50W en banda C y 20W en banda Ku. Estos niveles de potencia son adecuados para la fase final de amplificación de los terminales terrestres.
- d) Convertidores de bajo ruido:** los convertidores de bajo ruido realizan la doble función de amplificar y de reducir la frecuencia de la señal recibida, mientras que minimizan el ruido añadido a la señal. Es importante asegurarse de que el ruido de fase en los

osciladores se mantiene a niveles bajos. Los dispositivos de bajo ruido se utilizan en la primera fase de la conversión, ya que es el nivel de ruido de esta etapa el que determina el ruido general en toda la conversión.

- e) **Amplificadores y reductores de frecuencia:** los amplificadores de frecuencia se utilizan para traducir la señal destinada para la transmisión de frecuencia intermedia – típicamente unos 70 MHz– a una señal de microondas –6 GHz en banda C, 14 GHz en banda Ku–. Posteriormente esta señal se amplifica en un amplificador de alta potencia como los descritos en b.

Los reductores de frecuencia pasan la señal de microondas recibida por el terminal terrestre –4 GHz en banda C y 11 ó 12 en banda Ku– a frecuencia intermedia.

- f) **Módems y códecs:** cada terminal necesita un modulador y un demodulador para funcionar correctamente –módem–. Análogamente con los codificadores y decodificadores –códec–.

El término módem surge de la combinación de los términos modulador y demodulador. Un modulador digital de comunicaciones acepta bits de información y coge uno o más de esos bits para codificarlos en símbolos discretos. Cada símbolo tiene una relación directa con una forma de onda particular de duración fija, y estos símbolos se transmiten secuencialmente de tal manera que la frecuencia general de los componentes de la onda permanece dentro de un ancho de banda prescrito. La transmisión se realiza a una frecuencia central que es conocida por el equipo de recepción. La función del demodulador es recibir la transmisión enviada a dicha frecuencia y hacer la mejor estimación posible de los símbolos presentes. A partir de la estimación de los símbolos transmitidos, el demodulador reproduce el patrón de bits asociado. Como las transmisiones realizadas por los satélites están limitadas en potencia, el demodulador se necesita para tolerar las señales en presencia de ruido. En un sistema VSAT las limitaciones de potencia son importantes, por lo que la función del demodulador de detectar correctamente los símbolos en presencia de ruido es esencial para definir el rendimiento del enlace.

Ocorre algo similar en el caso de la codificación. Como en un satélite de comunicaciones la potencia es limitada, es importante intentar reducir ese requisito de potencia manteniendo el mismo nivel de servicio. Para ello se utilizan las técnicas de codificación, ya que permiten conseguir eso codificando los datos antes de la transmisión, de tal forma que si algún bit se recibe de forma errónea en el demodulador, el decodificador será capaz de reconstruir perfectamente los datos transmitidos. El uso de técnicas de codificación hace que la transmisión de bits extras sea necesaria, pero con este incremento del ancho de banda va asociada una disminución significativa de la potencia requerida para mantener el mismo nivel de servicio en términos de BER.

En el caso de los satélites de comunicación, la forma de codificación más utilizada son los códigos convolucionales.

Un sistema VSAT tiene que cumplir dos condiciones: el enlace de comunicaciones debe ser proporcionado por una pequeña antena y el terminal VSAT debe ser diseñado para conseguir el mejor rendimiento al mínimo coste. Los módems para los

terminales VSAT tienen un coste significativo en el terminal, y tienen una relación directa con el rendimiento del terminal.

El enlace *outbound* (HUB → satélite → VSAT) necesita una potencia significativa del transpondedor para poder dar servicio de difusión a la pequeña antena del terminal VSAT. Por ello, el uso de una eficiente modulación junto con unas técnicas de codificación adecuadas puede reducir a más de la mitad los costes del transpondedor. En el caso de sistemas con un alto número de terminales VSAT esa diferencia de coste no se notará mucho, pero en el caso de un sistema con pocos terminales, la diferencia en el coste será importante.

El enlace *inbound* (VSAT → satélite → HUB) no necesita una velocidad tan alta de datos como el *outbound*, pero la baja ganancia de transmisión de la antena limita el enlace. El uso de una eficiente modulación en este enlace tiene un impacto directo en las limitaciones de potencia de las transmisiones del VSAT y puede suponer un ahorro significativo en amplificadores de alta potencia –al haber menor limitación de potencia se transmite a mayor potencia, y por tanto, se necesitan menos amplificadores de alta potencia–.

En la mayoría de los casos la transmisión en el *inbound* no es continua y las señales transmitidas deben ser rápidamente adquiridas por los demoduladores de los HUBs. Las señales con bajo ratio de datos son más difíciles de adquirir y esto no solamente tiene un impacto en el coste del demodulador del HUB, sino que también reduce el rendimiento general. Se debe alcanzar un compromiso entre la elección del ratio de transmisión del *inbound*, el tiempo de adquisición y el coste de los demoduladores de los HUBs, todo ello manteniendo la calidad requerida y el rendimiento del enlace.

- g) Unidad de interfaz de red:** se necesita esta unidad para poder implementar un protocolo de acceso al satélite.

3.8.3 Aplicaciones y servicios VSAT.

Los sistemas VSAT se han desarrollado muy rápidamente, en concreto en los Estados Unidos, donde han dado apoyo y han permitido la aparición de nuevos servicios de comunicaciones que se han convertido en imprescindibles para la operación eficiente de muchas empresas y negocios.

Una de las consecuencias de este gran mercado es que los costes de producción de los pequeños terminales han caído a niveles relativamente bajos. Sin embargo, se podría argumentar que los VSATs aún representan un nicho de mercado y tienen aún que alcanzar su completo potencial.

En aquellos países en los que la regulación medioambiental es liberal, existe una competencia más sustancial con otras tecnologías, por ejemplo, fibra óptica, cable convencional y PCN (*Personal Communication Networks*).

Los sistemas VSATs también tienen un mayor papel que desempeñar en aquellos países del Tercer Mundo que prácticamente no tienen infraestructuras para comunicaciones terrestres.

Muchos estudios han confirmado que en aquellos países en vías de desarrollo en los que las comunicaciones vía satélite se han introducido recientemente, ha existido un crecimiento económico sustancial, por lo que se podría utilizar ese crecimiento económico en los sistemas VSAT –son sistemas de bajo coste y baja complejidad–, lo que podría proporcionar un mayor beneficio ya que existe falta de infraestructura de comunicaciones.

Las redes VSAT que ofrecen voz y servicios de datos, o incluso las que ofrecen solamente vídeos, están siendo ampliamente utilizadas para satisfacer las necesidades domésticas e internacionales. Este desarrollo está provocando que los servicios de comunicación evolucionen en función de las necesidades de los clientes, ya sea dentro de un país o siguiendo una base internacional.

Las aplicaciones de propagación de los sistemas VSAT están empezando a redefinir el carácter de las comunicaciones vía satélite. Hoy en día, los terminales VSAT son diferentes a lo que eran hace unos años. Ahora son más pequeños, más baratos y tienen mucho más rendimiento.

Los terminales VSAT no son solamente terminales de recepción. La mayoría son interactivos y pueden enviar o recibir voz y datos a cualquier punto en una red.

Los terminales VSAT, independientemente de si son para uso internacional, regional o doméstico, dependen (en coste y funcionalidad) de las estaciones HUB. La reciente tendencia a utilizar HUBs compartidos, técnicas automáticas de producción y otras medidas de reducción de costes, han contribuido al crecimiento de la industria de los VSAT.

Aun así, los sistemas VSAT no son la panacea. Ofrecen soluciones específicas para necesidades de comunicación específicas. Rellenan un hueco en el mundo de las comunicaciones que previamente no había sido rellenado por otro tipo de redes de comunicaciones terrestres o espaciales.

Existen tres aplicaciones principales para los VSATs:

- a) Difusión de datos a un gran número de puntos ampliamente distribuidos. Como ejemplo, este servicio es utilizado por la mayoría de agencias de prensa internacionales, de tal forma que así pueden conseguir noticias e incluso fotografías de gran calidad en distintas partes del mundo.
- b) Red interactiva de datos (a medio o bajo ratio) que da servicio a decenas de localidades y a cientos de vías según la demanda. Este tipo de redes privadas son la causa del crecimiento de los VSATs.
- c) Enlaces de voz y datos a localizaciones aisladas, por ejemplo islas, plataformas de extracción de petróleo, desiertos, etcétera.
- d) Aplicaciones que derivan de los principales sistemas de telecomunicación, ya sea por razones de seguridad, económicos, etcétera, o sofisticadas aplicaciones que no puedan ser mantenidas en las redes normales. Por ejemplo, muchas aplicaciones militares han encontrado en las redes VSAT la clave para sus comunicaciones.

De estas diferentes aplicaciones, podemos obtener tres tipos de terminales VSAT:

- a) **VSATs de difusión de espectro ensanchado:** este tipo de VSAT se utiliza de manera internacional con satélites Intelsat. El diámetro de los terminales es de 0.7 a 1 m. Las aplicaciones de este tipo de terminal son tales como distribución de datos científicos internacionales, noticias, actualizaciones de información financiera, datos meteorológicos, previsiones del clima, distribución de imágenes de alta calidad, publicaciones electrónicas, etcétera. La principal restricción es que el máximo ratio de datos es de 19.2 kbit/s y no existe capacidad de retorno para terminales remotos. La gran ventaja de este sistema se obtiene cuando existen muchos puntos de distribución y todos necesitan la misma información. El terminal, incluidos el microprocesador y la antena se puede producir al precio de 2500\$ por unidad. Una de las claves por las que este tipo de VSATs son tan fáciles de instalar es porque utilizan una modulación de espectro ensanchado, técnica que fue perfeccionada en aplicaciones militares, donde la protección tenía una alta prioridad en lugar de la interferencia. La señal se distribuye en una parte tan amplia del espectro que la información está completamente protegida contra el ruido y la interferencia. El mayor coste para este servicio VSAT es el que conlleva la estación HUB –mínimo un millón para construirlo–, por lo que para que sea efectivo se deben de cumplir dos condiciones:

- Debe de haber más de un terminal VSAT en la red.
- Utilizar un HUB compartido para repartir el coste entre los usuarios.

Otra manera de reducir los costes consiste en utilizar técnicas más efectivas de producción así como utilizar acuerdos de fabricación entre empresas.

A pesar de estos factores positivos, este es un mercado que empieza a estar saturado. Más allá de las agencias de noticias, servicios financieros y servicios científicos y meteorológicos no existen muchas más aplicaciones para la difusión de datos en un único sentido. La mayoría de los gobiernos y los negocios necesitan voz y datos interactivos en ambos sentidos, por lo que existe otro tipo de servicios VSAT para satisfacer esas necesidades.

- b) **VSATs interactivos de espectro ensanchado:** los VSATs interactivos más pequeños pueden recibir a un ratio de 19.2 kbps y transmitir a un ratio de 1.2 kbps o 2.4 kbps. Este tipo de VSAT tiene una apertura 1.2 – 2.4 m de diámetro. El factor limitante para este servicio es que la señal de retorno tiene un ratio muy bajo, por lo que no es muy efectivo en muchas aplicaciones, y no es adecuado para las comunicaciones por voz. Aunque se han desarrollado algoritmos avanzados para la codificación de la voz, la calidad que se obtiene suele ser pobre e incluso irreconocible, por lo que el coste suele aumentar bastante, y para solucionarlo se tienen que utilizar codificaciones digitales, existiendo así un nuevo tipo de VSATs.
- c) **VSATs digitales interactivos:** el área en la cual la industria de los VSAT está experimentando mayor crecimiento es en el mercado de VSATs interactivos que utilizan BPSK –*Binary Phase-Shift Keying*– para las transmisiones digitales. Estos

terminales pueden manejar como mínimo 64 kbps y a menudo pueden operar hasta a 2048 Mbps. Para conseguir unos ratios tan altos, sin embargo, se necesita una antena de mayor tamaño (unos 3,5 m de diámetro) y más potencia. El envío de los datos de altos ratios para pequeños terminales no está todavía optimizado, y se usa normalmente debido a limitaciones especiales, como por ejemplo, yacimientos de extracción de petróleo con espacios limitados para sus antenas. La principal clave es que tanto las velocidades de transmisión alcanzables como las óptimas están aumentando constantemente.

Los sistemas VSATs más utilizados hoy en día, que son aquellos que utilizan una antena de hasta 2,4 m de diámetro y utilizan transmisiones BPSK, han dado a conocer en el mercado a las estaciones terrestres personales. Esto es debido al pequeño tamaño, el bajo coste y la gran flexibilidad de estos sistemas.

3.8.4 Consideraciones económicas.

Los costes de un servicio dado varían considerablemente dependiendo del país en el que se dé el servicio. En general, el coste de las redes VSAT es menor que el coste de muchos servicios de comunicaciones terrestres.

Un factor económico importante es que los servicios de datos interactivos son más viables que los servicios de tipo *streaming*. Esto es debido a la habilidad de los sistemas VSAT para multiplexar señales de un diferente número de terminales de manera eficiente, algo que es más difícil de conseguir con tecnologías terrestres.

En el caso de Europa, la mayoría de servicios de telecomunicaciones son ofrecidos por redes terrestres operadas por las respectivas administraciones de telecomunicación y la mayoría de usuarios de las redes de datos se encuentran dentro de los límites de las redes nacionales.

El cálculo de costes para una red VSAT es difícil, ya que la mayor parte de la información, así como el coste del segmento espacial, no pertenece al dominio público. Los fabricantes de VSATs no revelan los verdaderos costes, y los usuarios hablan de ahorros de costes entre el 10 y el 30%. El cálculo de costes para el segmento espacial se complica porque se comparte con un número variado de terminales VSAT, de los cuales cada uno de ellos requiere un tiempo de acceso al canal. El número de terminales VSAT que pueden ser soportados por un segmento espacial determinado depende de la aplicación y de los requisitos de transmisión de datos. Además, el número de terminales VSAT también depende del protocolo de acceso múltiple que se haya implementado para acceder al canal.

En el caso del enlace de subida y del segmento espacial, hay que tener en cuenta los costes para el HUB –incluidos repuestos electrónicos–, moduladores, multiplexores y equipos necesarios para probar la transmisión. Los moduladores, multiplexores y equipos necesarios para pruebas dependen del número de terminales VSAT del sistema, por lo que el coste del HUB dependerá del número de terminales VSAT.

3.8.5 Consideraciones sociales.

Los sistemas VSAT son ideales para áreas rurales y para áreas en las que la infraestructura de comunicaciones es pobre o incluso inexistente.

Los motivos por los que los sistemas VSAT son tan buenos para estas zonas son:

- a) Consumen poca potencia.
- b) Son sistemas muy flexibles.
- c) Son sistemas relativamente baratos, accesibles para estas zonas en las cuales el poder adquisitivo es bajo.
- d) Son sistemas cuya instalación es muy sencilla y rápida.

Por estos motivos, los sistemas VSAT son los sistemas de comunicación más adecuados para las zonas que se encuentran en vías de desarrollo y que actualmente no disponen de otros sistemas.

Al ser sistemas baratos, los gobiernos de estos países tienen los recursos suficientes para adquirir los sistemas, aunque en muchas ocasiones estos sistemas son exportados por países desarrollados.

Pese a todos estos motivos y ventajas, estos sistemas solamente serán beneficiosos cuando el volumen de producción de los países industrializados permita suministrar los sistemas a costes marginales a países menos desarrollados, ya que los sistemas creados específicamente para los países del Tercer Mundo tienen más dificultades en cubrir la inversión inicial.

3.8.6 Aspectos regulatorios para sistemas VSAT.

La regulación de los sistemas VSAT se está llevando a cabo en muchas áreas, no solamente en aquellas relacionadas con las políticas de telecomunicaciones nacionales e internacionales. El control de los servicios y el equipamiento son ámbitos diferentes, y las autoridades nacionales e internacionales tratan de regularlas de manera diferente.

Lo que se debe regular no es el uso de los propios terminales VSAT, sino el modo de operación de la red y la derivación inherente a las redes satelitales.

Uno de los mayores problemas a la hora de establecer una red VSAT es el hecho de determinar quién tiene la autoridad y el poder de regular cada aspecto del sistema. El antiguo Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicaciones (CCIR), ahora conocido como ITU-R (*International Telecommunication Union Radiocommunication Sector*), publica recomendaciones e informes en los cuales se indican los parámetros técnicos de funcionamiento para las estaciones terrenas, pero no son tratados como estándares o especificaciones.

El antiguo Comité Consultivo Internacional Telegráfico y Telefónico (CCITT), ahora conocido como ITU-T (*ITU Telecommunication Standardization Sector*), también publica estándares relacionados con los requisitos.

Los operadores que regulan el segmento espacial como Intelsat y Aussat tienen sus propios procedimientos para operar, basados en las recomendaciones del ITU-R, que a menudo se toman como requisitos obligatorios. Adicionalmente, organismos nacionales o regionales como la CEPT (Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones) o la FCC (*Federal Communications Commission*) pueden imponer restricciones a los operadores, los cuales pueden o no incluirlas en algunas de las recomendaciones del ITU-R y ITU-T.

Otro aspecto importante de la regulación abarca problemas de instalación de antenas parabólicas, principalmente en relación a su localización, planificación, construcción y personal de seguridad (tanto física como de los peligros que entraña la radiofrecuencia).

Los aspectos más importantes que se han de regular son los relativos al control y monitorización de los sistemas de telecomunicaciones y de las redes satelitales.

Una de las características más importantes de una red VSAT es que se pueden evitar las instalaciones terrestres para proporcionar enlaces a muchos sitios dentro de la cobertura del satélite. Adicionalmente, otra de las mayores ventajas de un sistema de comunicación por satélite es que la cobertura se proporciona por todo el área geográfica que cubre la huella del satélite, motivo que explica porque un operador en un país puede dar servicios en otros.

Es importante diferenciar entre las redes de VSAT de un único sentido y las de doble sentido. En las de un único sentido, hay normalmente un enlace de subida transmitiendo a través del satélite a muchos terminales remotos, cada uno de los cuales es de solo recepción. En este caso, se necesitan licencias y autorizaciones –importante diferenciar entre licencias, autorizaciones y permisos–.

Las licencias y autorizaciones requeridas son las siguientes:

- Una licencia para la red. Por ejemplo, en el Reino Unido se necesita una licencia bajo la ley de Telecomunicaciones de 1984 (1984 *Telecommunications Act*). En otros países como Canadá, existe la obligación de utilizar un segmento espacial específico u otras instalaciones cuando alguno de los enlaces de bajada esté localizado en otro país.
- Una autorización para operar con cada uno de los terminales remotos de recepción de la red.
- En el caso en el cual los terminales remotos de recepción estén situados en uno o más países diferentes al terminal transmisor, se necesita un permiso de cada uno de esos países para operar con el enlace de bajada. Adicionalmente, también se necesita coordinación con Eutelsat e Intelsat para proporcionar las instalaciones necesarias para el segmento espacial.
- Se requiere de aprobaciones de planificación y localización para poder asegurar que se cumplen todas las condiciones medioambientales. Por ejemplo, en el Reino Unido, si se utilizan antenas de 0.6 metros o de 0.9 metros, no se necesitan acuerdos, pero en caso de utilizar mayores o de estar situadas en áreas de uso no doméstico sí.
- Se necesitan acuerdos, tanto para el enlace ascendente como para los terminales remotos, para asegurarse de que éstos cumplen las condiciones de seguridad adecuadas.

- Se necesitan varias posibilidades de localización del enlace ascendente, con el objetivo de evitar la interferencia de o hacia los enlaces de microondas terrestres y a otros terminales de transmisión o recepción.
- En el caso específico de las redes VSAT de doble sentido, se necesita una licencia específica para poder realizar cualquier operación. En muchos países la operación de difusión o de las redes de punto a multipunto es preferida a una red de servicios de doble sentido. En la mayoría de los casos, los servicios y redes de voz conmutada deben estar protegidos por la administración, y no pueden ser suministrados por redes de un único sentido. Como las redes de VSAT de dos sentidos pueden proporcionar una conexión *full dúplex* entre dos o más localizaciones, las administraciones son reacias a permitir la propiedad privada y la explotación.
- Se necesita un permiso para los transmisores, de tal forma que puedan operar con cada uno de los terminales remotos interactivos con el objetivo de evitar o minimizar las interferencias con los enlaces terrestres y satélites adyacentes. También se necesitarán acuerdos adecuados para el satélite.

Se debe destacar el papel de la Comisión Europea. La política de la Comisión Europea respecto a las redes de comunicaciones por satélite abarca las siguientes áreas:

- Liberalización total del espacio terreno, incluyendo la abolición de todos los derechos exclusivos o especiales en esta área. Esto se aplica tanto a terminales de recepción como a terminales de transmisión y recepción que necesiten cualquier tipo de licencia o aprobación.
- Acceso libre a la capacidad del segmento espacial. El artículo 16 a del Acuerdo Operativo de Eutelsat dice que la asignación de la capacidad del segmento espacial tiene que ser proporcionado por Eutelsat o, en el caso de un territorio fuera de su jurisdicción, por una entidad de telecomunicaciones. Los acuerdos de Intelsat e Inmarsat tienen cláusulas similares.
- Libertad comercial completa para los proveedores del segmento espacial. Las organizaciones como Eutelsat e Intelsat deben ser capaces de comerciar directamente con los usuarios finales. También, deben ser capaces de determinar de forma precisa cuánta capacidad necesitará cada tipo de servicio.
- Medidas de armonización necesarias para facilitar el suministro y el uso de los servicios asociados en Europa. Esto hace referencia al reconocimiento mutuo de licencias y acuerdos entre diferentes Estados Miembros, por lo que, un operador de servicios VSAT no tendrá que obtener acuerdos de cada uno de los Estados Miembros.

La Comisión Europea también está interesada en garantizar que los Estados Miembros no tengan que realizar los procedimientos de coordinación para cada país.

Por otro lado, el ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) también tiene un papel importante en la regulación. Anteriormente a su creación, los estándares eran establecidos por la CEPT. El papel del ETSI es crear estándares europeos de telecomunicación. En el caso concreto de comunicaciones por satélite, el responsable para terminales VSAT es el subcomité técnico SES (*Satellite Earth Station*). Su función es preparar estándares y documentos para todos los tipos de estaciones terrestres.

Estos documentos y estándares abarcan todos los aspectos de la operación de la estación terrestre, incluyendo patrones RF, interconexión con redes públicas y cuestiones relacionadas.

También, existen organizaciones como la ITU-R y la ITU-T, cuyas funciones relacionadas con la regulación de terminales y redes VSAT se ha explicado anteriormente.

3.8.7 Historia y evolución de los sistemas VSAT.

3.8.7.1 Repaso histórico

La historia de los VSATs es relativamente corta, ya que existen desde hace un par de décadas.

Antes de la aparición de los VSATs las estaciones terrestres eran grandes y muy caras. Había antenas de alrededor de 30 metros de diámetro y varios amplificadores de microondas por cada salida de RF.

Por norma general, las antenas tenían una eficiencia muy alta y la temperatura de ruido de sus receptores era muy baja. Los elementos críticos de radiofrecuencia estaban diseñados de manera que se redujeran al mínimo las pérdidas de las guías de ondas, y en consecuencia, se maximizara la potencia disponible.

Adicionalmente, los satélites solo se consideraban adecuados para comunicaciones de larga distancia, por lo que las antenas tenían que tener una cobertura muy amplia y una ganancia muy baja. Es decir, los diseñadores se encontraban con satélites con un factor de ruido y una PIRE muy baja que exigía una estación terrena demasiado grande para que los enlaces fueran viables.

La tecnología satelital fue mejorando lentamente. Como consecuencia de la llegada de los sistemas regionales, fue necesaria una mejora en el tamaño y en la potencia de las estaciones terrenas. Estos sistemas necesitan poca cobertura sobre la superficie terrestre, pero necesitan antenas de alta ganancia, con la consecuente mejora en el factor de mérito y en la PIRE del satélite. Como consecuencia de esto, fue posible conseguir reducciones en el tamaño de las antenas y en el tamaño de las estaciones terrestres.

Durante las siguientes décadas, la tecnología de los satélites continuó mejorando. Se consiguió una potencia superior en los transpondedores de los satélites y una reducción de la temperatura de antena del satélite. Esto, unido a la introducción de sistemas que tienen haces puntuales (como los sistemas de satélites regionales) posibilitó la aparición de las estaciones terrenas con antenas de 2 metros de diámetro para la recepción de señales.

Durante las siguientes décadas, hubo dos desarrollos que revolucionaron el diseño y el funcionamiento de las estaciones terrenas. El primero fue el desarrollo de los amplificadores basados en transistores de tipo FET. La utilización del oscilador de resonancia dieléctrica favoreció la producción en gran escala de estos amplificadores, y con esto se consiguió un mejor rendimiento de las estaciones terrenas. El segundo acontecimiento importante fue la disponibilidad de los amplificadores de potencia FET. Para seguir mejorando la calidad de las estaciones terrenas, se tomaron medidas tales como la reducción del ancho de banda requerido, limitando así a que cada estación terrena transmita a una velocidad menor o con

una única portadora. También se limitó a los VSAT de tal forma que operaran con una configuración de doble salto. Estas dos medidas fueron medidas desfavorables, pero fueron temporales y necesarias para mejorar de la calidad de los enlaces.

Otro de los inconvenientes de los sistemas VSAT es el coste de la estación HUB, ya que se convierte en una carga para todo el sistema y limita el coste de la red. Aunque la estación HUB es innecesaria en muchas aplicaciones, su existencia ha provocado el desarrollo de un software sofisticado para el control de las redes VSAT. Este software permite el control de la asignación del acceso múltiple, la asignación de los diferentes canales, la verificación y el mantenimiento de los sistemas VSAT, la medida del uso, de funciones de facturación, etcétera. Todas estas funciones son funciones necesarias incluso en un sistema en el que no exista estación HUB.

La regulación medioambiental ha sido un factor importante en el desarrollo de los sistemas VSAT. En muchos países, las administraciones han mantenido su monopolio de las telecomunicaciones dentro de las fronteras nacionales. Como consecuencia a esto, se ha obligado a que el tráfico entre países funcione como pasarelas internacionales y ha habido un estricto control de la operación y de la capacidad de los equipos. Las restricciones de este tipo no son lógicas para las comunicaciones por satélite, debido a su capacidad de larga distancia, su capacidad punto – multipunto y su gran flexibilidad.

El desarrollo en los sistemas VSAT y en las comunicaciones vía satélite vendrá marcado por las necesidades del mercado de reducir los costes del sistema cada vez más y ampliar la gama de servicios. Con los avances técnicos y de fabricación, se pretende abaratar el coste de fabricación de cada terminal VSAT, y por tanto, abaratar el coste general del sistema completo. Existe una tendencia hacia los USAT (*Ultra Small Aperture Terminal*), tendencia que proporcionará la aparición de servicios de datos basados en difusión directa del satélite.

3.8.7.2 Mejoras tecnológicas

Los VSATs modernos ya alcanzan buenos rendimientos, gracias a sus equipos de radiofrecuencia, por lo que no se pueden esperar grandes mejoras de rendimiento en este aspecto, a parte de la introducción de técnicas de fabricación que reduzcan el coste. Los componentes de recepción de bajo nivel de ruido, como por ejemplo el amplificador y el convertidor de frecuencia, están normalmente integrados en un bloque de microondas con una bocina. Como los niveles de ruido en recepción ya son realmente bajos, pocas mejoras se pueden esperar, como mucho alguna en el amplificador de ruido, que puede provocar un aumento en el factor de mérito G/T de 1 ó 2 dB.

En el caso de los transmisores la situación es diferente. La capacidad de la mayoría de los enlaces VSAT es limitada debido a la potencia de subida disponible del propio VSAT, que a su vez se basa en la potencia disponible de los amplificadores de estado sólido. Debido a las mejoras tecnológicas y al uso de estos amplificadores y a los amplificadores de potencia FET se ha conseguido un aumento constante de la potencia disponible.

Para los subsistemas de radiofrecuencia de los sistemas VSATs (antenas, amplificadores de potencia, bocinas, filtros de bajo ruido) se puede ver una tendencia creciente hacia la integración, con la consiguiente reducción del precio unitario. Por ejemplo, se puede destacar

el uso de MMICs (*Monolithic Microwave Integrated Circuits*), que reducen el coste pero introducen una serie de restricciones técnicas, por lo que los fabricantes han de ser cautelosos a la hora de introducir esta tecnología en los diseños de receptores y transmisores VSAT.

No sólo existen mejoras en los equipos externos, también hay que destacar las mejoras en el equipamiento interno. Se ha ido avanzando a un procesamiento cada vez más digital: se toma la señal en frecuencia intermedia (FI), se digitaliza, y se realizan todas las operaciones con componentes digitales. Este enfoque es costoso en términos de desarrollo, sin embargo, una vez que se haya implementado el coste recurrente será bajo. Esto significa que todo el proceso de demodulación, decodificación, detección y corrección de errores será llevado a cabo por software.

Por último, se han introducido mejoras basadas en software de control. Estas técnicas, más que ninguna anterior, diferencian los VSAT frente al resto de estaciones terrenas ya que permiten utilizar software sofisticado para controlar y regular el tráfico, monitorizarlo, etcétera, y representan uno de los mayores logros conseguidos y uno de los áreas de desarrollo más importantes para seguir mejorando los sistemas VSATs.

3.8.7.3 Uso de nuevas bandas de frecuencia.

Los primeros sistemas VSAT operaban en banda C (subida 6 GHz, bajada 4 GHz) debido a que sólo la capacidad de la banda C estaba disponible en ese momento, y los VSAT se inventaron como un medio para utilizar esa capacidad de manera más efectiva y más rentable. Sin embargo, el amplio ancho de haz de las antenas terrestres utilizadas en esta banda, dio lugar a la interferencia entre unos sistemas satelitales y otros. Eso, unido al hecho de que la banda C se utiliza ampliamente para las comunicaciones terrestres da lugar a que la mayoría de operaciones en esta banda sufran problemas de interferencia.

Se han tomado medidas especiales para evitar la interferencia, como por ejemplo, técnicas de espectro ensanchado, pero no han tenido mucho éxito.

Por lo tanto, el tráfico de los VSAT se ha ido moviendo progresivamente hacia la banda Ku (subida 14 GHz, bajada 12 GHz). En esta banda existe una mayor cantidad de espectro disponible para las comunicaciones vía satélite y menos interferencia potencial, debido a las anchuras de haz más estrechas de las estaciones terrestres. El problema es que, como esta banda también se utiliza para la comunicación vía satélite convencional entre terminales grandes y para la distribución de televisión y para enlaces terrestres de microondas, también existirá una limitación de interferencia, por lo que se debe utilizar otra banda distinta.

Otra banda de espectro disponible para la comunicación vía satélite es la banda Ka (subida 30 GHz, bajada 20 GHz), que tiene un total de 2 a 5 GHz de espectro asignado. Esta banda es adecuada para el tráfico de sistemas VSAT, ya que actualmente está poco utilizada y es propensa a menos problemas de interferencia. Uno de los inconvenientes de esta banda, reside en las condiciones de propagación. Existe mayor atenuación que en otras bandas y existen tiempos de indisponibilidad.

Para superar las dificultades de propagación y mejorar la disponibilidad se emplean técnicas, tales como:

- a) **Diversidad de sitios:** técnica en la cual las redes en las que existen grupos locales de VSATs conectados entre sí por redes terrestres de área local pueden conmutar el tráfico entre VSATs para evitar los efectos perjudiciales de la propagación.
- b) **Compartición de recursos:** esta técnica se aplica cuando se tiene un entorno de red con muchas estaciones terrenas distribuidas en un amplio área geográfica. A las estaciones que experimenten mayores indisponibilidades, se les asigna de manera automática más recursos en términos de ancho de banda, tiempo o potencia que al resto de las estaciones que operan en condiciones normales.
- c) **Diversidad de frecuencias:** en esta técnica, las redes que tienen capacidad de frecuencia dual usarán la capacidad de la banda Ka para la mayoría de sus comunicaciones, pero asignando dinámicamente una pequeña cantidad de la capacidad de la banda Ku a aquellas estaciones que tengan problemas de indisponibilidad.
- d) **Tasa variable:** técnica gracias a la cual es posible almacenar información en tiempo no real y enviarla durante los períodos de disponibilidad mientras que se produce la reasignación de la capacidad disponible para el tráfico.

3.8.7.4 VSAT y el servicio móvil.

El servicio de comunicación móvil, unido a los diferentes servicios regionales, constituye un sistema VSAT exitoso. Este tipo de servicio no se puede expandir ya que opera en una banda de frecuencias restringida. Por ejemplo, las frecuencias que se utilizan en banda L ofrecen asignaciones de alrededor 34 MHz, cantidad insuficiente para ofrecer servicios significativos. También se pueden ofrecer servicios de datos para transpondedores de satélites para aplicaciones móviles en banda Ku y se están llevando a cabo pruebas en banda Ka. Esta banda ofrece servicios móviles que operen no solamente con datos, sino también con voz. El concepto tradicional de asignación de frecuencias separadas para servicios móviles, fijos y de difusión está quedando obsoleto, y se tiene un enfoque en el cual el uso del espectro satisface un amplio rango de necesidades de comunicaciones por satélite.

3.8.7.5 Sistemas de alta capacidad.

Los sistemas VSAT actuales funcionan con un *throughput* de 128 kbps aproximadamente. Las mejoras existentes en las estaciones espaciales y terrenas unidas al uso de bandas de mayores frecuencias darán lugar a un *throughput* mucho más alto. Con las nuevas bandas de frecuencia, también se permitirá que el sistema VSAT opere sin HUB, con una configuración VSAT – satélite – VSAT, y ofrecerá la posibilidad de transmitir y recibir materiales de vídeo conferencia, datos digitales, televisión y otros servicios. Esta tendencia continuará así, aunque también seguirán existiendo sistemas VSAT con *throughputs* limitados por el satélite, el espectro o algunas estaciones terrenas.

3.8.7.6 Desarrollos en el sistema.

El mayor problema existente con los sistemas de comunicación a larga distancia es que cubrir un área geográfica muy amplia desde órbitas geosíncronas implica antenas de satélites de una ganancia muy baja. O de otra forma, la potencia disponible del satélite y la sensibilidad se reparten por todo esa área, por lo que disminuye.

Esto se puede solucionar haciendo que los satélites tengan más potencia y una mayor sensibilidad, de tal forma que compensen la pérdida de ganancia. El problema que esto conlleva es que mayor potencia implica más masa en órbita y más coste por MHz.

Para solucionar este problema, la mayoría de los satélites que manejan tráfico intercontinental tienen distintos haces puntuales con los que cubren las zonas de mayor población. Estos haces, de manera individual, tienen la suficiente ganancia como para que el sistema general sea eficiente.

El nuevo problema que surge es cómo interconectar el tráfico de los distintos haces puntuales. En los sistemas de comunicaciones actuales, la interconexión se realiza de forma manual. Cuando tenemos un sistema con un amplio número de terminales VSAT, realizar la interconexión de manera manual es inviable, por lo que hay que realizarla de otra manera. La manera es mediante conmutación a bordo y procesamiento en el propio satélite.

En teoría, la solución de la conmutación y procesamiento a bordo del satélite puede ser muy efectiva, pero en la realidad la tendencia es otra. En realidad, lo que ocurre es que los sistemas terrestres se han convertido cada vez menos dependientes del satélite.

3.9 Formulación para el cálculo del balance de enlace en un sistema VSAT.

A la hora de realizar cualquier cálculo para un sistema VSAT, se ha de diferenciar entre el enlace *outbound* y el enlace *inbound*. El enlace *outbound* es aquel que está formado por el HUB, el satélite y el terminal VSAT –en ese orden–. El enlace *inbound* está formado por el terminal VSAT, el satélite y el HUB –en ese orden–.

A su vez, dentro de cada enlace, hay que diferenciar entre enlace ascendente y enlace descendente. Por lo que, dentro del enlace *outbound* tendríamos el enlace ascendente –del HUB al satélite– y parte descendente –del satélite al terminal VSAT–. Análogamente, para el enlace *inbound* tenemos, el ascendente –del terminal VSAT al satélite– y el descendente –del satélite al HUB–.

Es importante decir que para cada enlace (ascendente y descendente) generalmente se tendrán distintas frecuencias, importantes a la hora de realizar los cálculos.

En las siguientes imágenes se puede ver un esquema de los enlaces *inbound* y *outbound*:

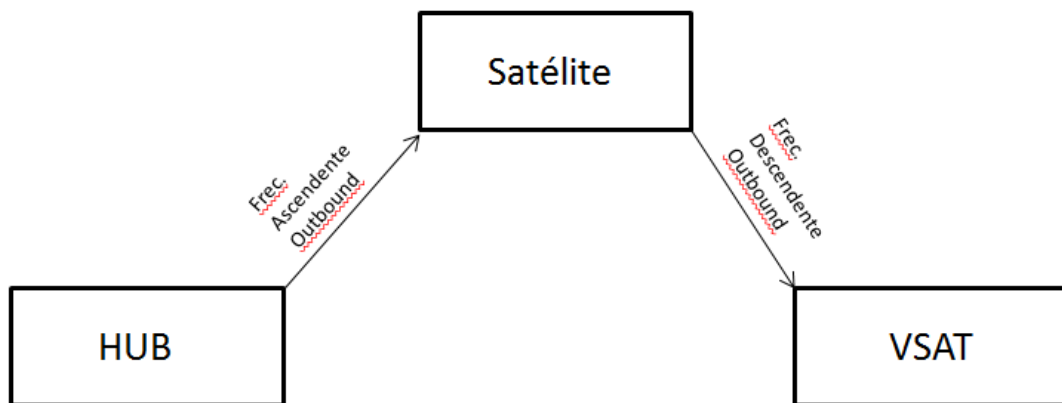


Imagen 20: Enlace *outbound*.

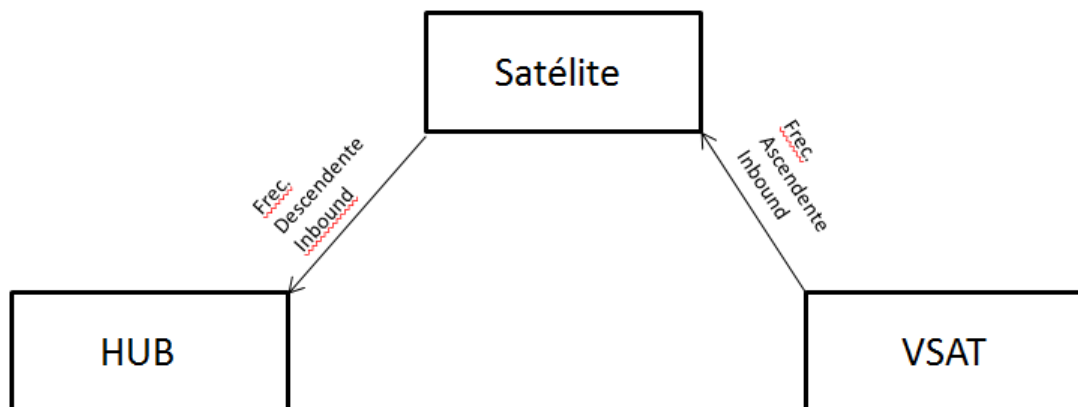


Imagen 21: Enlace *inbound*.

Por cada entidad (HUB, satélite y VSAT), se tendrán diferentes datos. Los datos que existen y se pueden utilizar para realizar un cálculo del balance de enlace son los siguientes:

- Potencia de transmisión.
- Ganancia de transmisión.
- PIRE.
- Ganancia en recepción.
- Temperatura de antena.
- Diámetro de antena.
- Eficiencia de radiación de la antena.
- Pérdidas en transmisión –por terminales de mala calidad–.
- Pérdidas en recepción –por terminales de mala calidad–.
- IBO (*Input BackOff*), sólo en el satélite.
- OBO (*Output BackOff*), sólo en el satélite.
- Frecuencias.

- Ancho de banda del transpondedor del satélite.
- Ancho de banda del HUB.
- Ancho de banda de cada terminal VSAT.
- Número de terminales VSAT.
- Latitud (del HUB, VSAT y satélite).
- Longitud (HUB, VSAT, satélite).

También, existen datos propios a cada enlace, en vez de a cada entidad. Los datos propios de cada enlace son:

- Tasa de transmisión.
- Modulación/codificación utilizada.
- Eficiencia espectral.

No siempre nos darán todos los datos, si no que tendremos disponibles una serie de ellos y con esos tendremos que conseguir los necesarios para realizar el cálculo del balance de enlace.

Por ejemplo, a partir de la ganancia de transmisión y la potencia de transmisión, se consigue la PIRE. Si no tenemos el dato de la ganancia de recepción, podemos calcularlo a partir del diámetro de antena, la eficiencia de radiación y de λ , que a su vez se obtiene con la velocidad de la luz y la frecuencia del enlace. Los anchos de banda de cada canal (para el HUB y los terminales VSAT) se pueden obtener a su vez utilizando la tasa de transmisión y la eficiencia espectral, etcétera.

Cuando hablamos de cálculo del balance de enlace nos estamos refiriendo a la relación señal a ruido que existe en dicho enlace. En el caso de las comunicaciones vía satélite, se calcula la relación portadora a ruido (C/N, si tenemos en cuenta el ancho de banda, o C/N0, cuando no se tiene en cuenta el ancho de banda).

Es más recomendable calcular el C/N0, ya que no tiene en cuenta el ancho de banda, por lo que puede ser calculado de manera más sencilla.

La forma de calcular la relación portadora a ruido (C/N) es la siguiente:

- **Outbound ascendente:**

$$\frac{C}{N_{0\uparrow}} = PIRE_{Hub} + \frac{G}{T_{satélite}} - L_{0\uparrow} - IBO_{sat} - 10 \log KB \quad (52)$$

Donde la PIRE se mide en dBW, G/T en dB/K, las pérdidas, IBO y $10 \log KB$ se miden en dB, por lo que finalmente, las unidades de la relación $\frac{C}{N}$ son dB.

De ahí,

$$PIRE_{Hub} = P_{tx} + G_{tx} \quad (53)$$

Tanto la potencia de transmisión, como la ganancia y la PIRE expresadas en dB.

En el momento en el que se realiza el cálculo de la PIRE de alguno de los elementos del sistema, es importante tener en cuenta si está referenciada a un ancho de banda concreto. Cuando esto ocurre, la PIRE que se ha de utilizar se calcula de la siguiente manera:

$$PIRE' = PIRE - 10 \log \frac{BW_{ref}}{BW_{canal}} \quad (54)$$

Donde PIRE es la dada como dato (en dB), BW_{ref} es el ancho de banda al cual está referenciada la PIRE (en Hz) y BW_{canal} es el ancho de banda del HUB, satélite o terminal VSAT, según corresponda (también en Hz). El cálculo del ancho de banda de cada canal se realiza de manera general de la siguiente forma

$$BW_{canal} = \frac{R}{E} \quad (55)$$

Donde R es la tasa de transmisión medida en bps y E es la eficiencia espectral, medida en bits/Hz.

Para calcular el factor de mérito, $\frac{G}{T}$:

$$\frac{G}{T} = G - 10 \log T \quad (56)$$

Donde T es la temperatura en Kelvin y G es la ganancia en decibelios, que a su vez se puede calcular de la siguiente forma,

$$G = 10 \log \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (57)$$

Donde η es la eficiencia de radiación de la antena, D es el diámetro de la antena en metros y $\lambda = \frac{3e^8}{f}$ en m.

Las pérdidas de propagación en espacio libre –que es el modelo de pérdidas que se utiliza para realizar el cálculo del balance de enlace, aunque existen otros modelos de pérdidas– se calculan de la siguiente forma

$$L = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (58)$$

Donde d es la distancia existente entre el HUB y el satélite o el satélite y el VSAT (en metros), y se calcula de la siguiente manera

$$d = \sqrt{(Re + h)^2 + Re^2 - 2Re(Re + h)\cos\varphi\cos\lambda} \quad (59)$$

Donde R_e es el radio equivalente de la tierra en metros, h la altura del satélite en metros, φ la longitud relativa y λ la latitud relativa (ambas en grados). Como el satélite es GEO, su latitud será cero, por tanto, la latitud relativa que se utilizará corresponderá a la latitud de la estación terrena. En el caso de la longitud relativa, la longitud del satélite es distinta de cero, por lo que es necesario conocer la orientación de las longitudes. En caso de que el satélite y la estación terrena estén orientados de la misma manera (ambos con orientación este u oeste), la longitud relativa será el valor absoluto de la resta de los valores. En caso de que la orientación sea distinta (uno situado en el este y otro en el oeste, o viceversa), la longitud relativa será la suma de los valores de las longitudes.

Por último se realiza el cálculo de $10 \log KB$ donde K es una constante ($k = 1.38e^{-23}$) y B es el ancho de banda disponible para el *outbound* (en Hz). Como el ancho de banda del *outbound* es complicado de obtener, es recomendable realizar el cálculo de $\frac{C}{N_0}$ en vez del de $\frac{C}{N}$.

El cálculo se realiza de la siguiente forma:

- **Outbound ascendente:**

$$\frac{C}{N_{0\uparrow}} = PIRE_{Hub} + \frac{G}{T_{satélite}} - L_{O\uparrow} - IBO_{sat} - 10 \log K \quad (60)$$

Todos los componentes de la ecuación 59 se calculan de la misma forma que se ha expuesto en ecuaciones anteriores. La diferencia existente entre esta ecuación y la ecuación 51 es que en ésta no se necesita el ancho de banda del enlace, lo que facilita la realización del cálculo.

En este caso, la PIRE está medida en dBW, la G/T en dB/K, las pérdidas y el IBO en dB y $10 \log K$ se mide en dB/Hz, por lo que finalmente, las unidades de la relación $\frac{C}{N_0}$ son dB/Hz.

- **Outbound descendente:**

$$\frac{C}{N_{0\downarrow}} = PIRE_{satélite} + \frac{G}{T_{VSAT}} - L_{O\downarrow} - OBO_{sat} - 10 \log KB \quad (61)$$

$$\frac{C}{N_{0\downarrow}} = PIRE_{satélite} + \frac{G}{T_{VSAT}} - L_{O\downarrow} - OBO_{sat} - 10 \log K \quad (62)$$

Igual que en los casos anteriores, las unidades de la PIRE son dB, las de G/T son dB/K, las de las pérdidas y el OBO y el factor $10 \log KB$ son dB y las del factor $10 \log K$ son dB/Hz, por lo que finalmente las unidades de la relación $\frac{C}{N}$ son dB y las de la relación $\frac{C}{N_0}$ son dB/Hz.

En este caso, todos los componentes de la ecuación se realizan con las ecuaciones que se han expuesto anteriormente, con sus datos correspondientes.

En este punto, tenemos los valores del balance de enlace ascendente y descendente del enlace *outbound*. –Importante, cuando calculamos $\frac{C}{N_0}$ se mide en dBHz y cuando realizamos el cálculo de $\frac{C}{N}$ se mide en dBs–.

Una vez que se han realizado los cálculos del enlace ascendente y descendente del *outbound*, se puede proceder a calcular el valor de la relación portadora a ruido para el enlace *outbound* en general.

El cálculo se realiza de la siguiente manera,

$$\left(\frac{c}{n_0}\right)_{OT}^{-1} = \left(\frac{c}{n_0}\right)_{O\uparrow}^{-1} + \left(\frac{c}{n_0}\right)_{O\downarrow}^{-1} \quad (63)$$

Expresadas todas las relaciones $\frac{c}{n_0}$ en unidades naturales.

Posteriormente se ha de calcular la relación portadora a ruido para el *inbound*, que se hace de la siguiente forma:

- **Inbound ascendente:**

$$\frac{C}{N_{I\uparrow}} = PIRE_{Vsat} + \frac{G}{T_{satélite}} - L_{I\uparrow} - IBO_{sat} - 10 \log KB \quad (64)$$

$$\frac{C}{N_{0I\uparrow}} = PIRE_{Vsat} + \frac{G}{T_{satélite}} - L_{I\uparrow} - IBO_{sat} - 10 \log K \quad (65)$$

- **Inbound descendente:**

$$\frac{C}{N_{I\downarrow}} = PIRE_{sat} + \frac{G}{T_{Hub}} - L_{I\downarrow} - OBO_{sat} - 10 \log KB \quad (66)$$

$$\frac{C}{N_{0I\downarrow}} = PIRE_{sat} + \frac{G}{T_{Hub}} - L_{I\downarrow} - OBO_{sat} - 10 \log K \quad (67)$$

Igual que en los casos anteriores, las unidades de la PIRE son dB, las de G/T son dB/K, las de las pérdidas y el OBO y el factor $10 \log KB$ son dB y las del factor $10 \log K$ son dB/Hz, por lo que finalmente las unidades de la relación $\frac{C}{N}$ son dB y las de la relación $\frac{C}{N_0}$ son dB/Hz.

Una vez que se han realizado los cálculos del *inbound* ascendente y descendente, se procede a realizar el cálculo de la relación portadora a ruido total, que se realiza de la siguiente forma

$$\left(\frac{c}{n_0}\right)_{IT}^{-1} = \left(\frac{c}{n_0}\right)_{I\uparrow}^{-1} + \left(\frac{c}{n_0}\right)_{I\downarrow}^{-1} \quad (68)$$

Expresadas todas las relaciones $\frac{c}{n_0}$ en unidades naturales.

Una vez que se han realizado los cálculos de la relación portadora a ruido para ambos enlaces, se ha de realizar el cálculo de la energía por bit y por ruido, parámetro con el cual posteriormente podremos calcular la probabilidad de error de bit (BER).

El cálculo de la energía por bit y por ruido se realiza de la siguiente forma,

$$\frac{e_b}{n_0} = \frac{c}{n_0} \cdot \frac{1}{R_b} \quad (69)$$

Donde R_b es la tasa de transmisión utilizada para el enlace (en bps), y $\frac{c}{n_0}$ es la relación portadora a ruido en unidades naturales.

Una vez que se ha calculado la relación energía por bit y ruido, se procede a calcular la probabilidad de error de bit (BER). La probabilidad de error de bit depende de la modulación utilizada en el enlace. Con el término modulación hacemos referencia al conjunto de técnicas que se utilizan para transportar información sobre una onda portadora. Con estas técnicas se posibilita transmitir más información y se consigue una mayor resistencia contra ruidos e interferencias.

Existen diferentes modulaciones, que dependen del parámetro sobre el que se actúe. Las que más se utilizan en estos casos suelen ser:

- N-QAM –*Quadrature Amplitude Modulation*–: Modulación de amplitud en cuadratura.
- BPSK –*Binary Phase-Shift Keying*–: Modulación por desplazamiento de fase binaria.
- QPSK –*Quadrature Phase-Shift Keying*–: Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura.

En función de la modulación utilizada, la probabilidad de error de bit se calcula de una forma o de otra. Por ejemplo, en el caso en el que la modulación utilizada sea una BPSK o una QPSK, la probabilidad de error de bit (BER) se calcula de la siguiente forma,

$$BER = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (70)$$

Donde $\frac{E_b}{N_0}$ es la relación energía por bit y ruido medida en dB y Q es la función Q –ver anexo–.

En el caso de utilizar una M-QAM, la manera de realizar el cálculo de la probabilidad de error de bit es más compleja, y es de la siguiente forma,

$$BER = 2\left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) \cdot Q\left(\sqrt{\frac{3}{M-1} \frac{\log_2 M E_b}{\eta}}\right) \quad (71)$$

Donde η es la eficiencia espectral asociada a la modulación.

Una vez que ya se ha realizado el cálculo de la probabilidad de error de bit, el cálculo del balance de enlace se considera finalizado. Con este parámetro es con el cual se realiza la valoración de la calidad del enlace. En función de si el valor del parámetro es mayor o menor a

un determinado valor umbral, se considerará que el enlace tiene una calidad satisfactoria o que el enlace satelital es malo.

4. Descripción de la aplicación.

4.1 Estructura y funcionalidades.

La aplicación desarrollada en este Trabajo Fin de Grado permite realizar el estudio del balance de enlace para cualquier sistema VSAT. Como ya se ha mencionado, es interesante realizar un estudio de la calidad de un enlace de un sistema VSAT debido a que existen pocas herramientas capaces de hacerlo manera exhaustiva. Existen dos situaciones que son interesantes estudiar. Son las siguientes:

La primera situación hace referencia a un sistema VSAT convencional. Es decir, un sistema en el que haya un HUB fijo en una determinada posición, un satélite geoestacionario fijo en una determinada posición y un número determinado de terminales VSAT fijos en una posición.

La segunda situación hace referencia a un sistema en movimiento. En esta nueva situación, tenemos un sistema VSAT diferente. En este caso tendremos un HUB fijo y un satélite geoestacionario también fijo. La gran diferencia reside en el terminal VSAT. En esta nueva situación, el terminal VSAT no estará en una posición fija, sino que estará en continuo movimiento.

Es interesante introducir esta diferencia ya que con ella se podrá estudiar la variación de diferentes parámetros del sistema en función de la posición del terminal VSAT. Esto permitirá al usuario hacer una estimación y obtener unas conclusiones de en qué zonas es mejor realizar la instalación futura de un determinado sistema VSAT.

En ambas situaciones se realizan una serie de cálculos que permiten estudiar la calidad del enlace. En la primera situación, se realizan los cálculos de la relación portadora a ruido para el enlace *outbound* e *inbound*. También, en los casos en los que sea posible, se realizará el cálculo de la relación energía por bit a ruido y de la probabilidad de error de bit, que es el parámetro que permite evaluar la calidad del enlace.

En la segunda situación se realizan los mismos cálculos, y adicionalmente, se realizan los cálculos de los ángulos de elevación y de azimut, que permiten obtener la cobertura del sistema. La realización de todos los cálculos, esta vez, depende de la posición del terminal, por lo que irá variando en función de la misma.

La manera de realizar los cálculos se ha descrito anteriormente, y puede verse en el capítulo “3.9 Formulación para el cálculo del balance de enlace en un sistema VSAT.”.

Por otro lado, existen diferentes maneras de simular el movimiento del terminal, de las cuales en la herramienta se han implantado las siguientes.

La primera simula el movimiento del terminal VSAT a través de una trayectoria recta. En este caso, el usuario ha de introducir únicamente el punto inicial y el punto final del movimiento del terminal. También, se ha de introducir una determinada resolución, que hace referencia al número de puntos que se desean evaluar a lo largo de la trayectoria del terminal, de tal forma

que cuanto mayor sea la resolución introducida, más puntos se estudiarán, y por lo tanto los cálculos serán mucho más precisos.

La segunda forma de simular el movimiento del terminal VSAT es introduciendo manualmente todos los puntos deseados. La aplicación permite introducir hasta treinta y cinco puntos distintos en los cuales se realizarán los cálculos del sistema.

Previamente al desarrollo de la aplicación se marcaron dos objetivos claves sobre la misma. El primer objetivo era conseguir que la aplicación fuera lo más interactiva y gráfica posible. Una aplicación interactiva hace que el manejo sea más intuitivo, y por lo tanto, más sencillo. Además, permite al usuario experimentar y manejar la aplicación a su gusto, y permite al usuario tener el control de la misma.

El segundo objetivo marcado es que la aplicación fuera lo más modular posible. Con un diseño modular, se consigue una mayor facilidad y flexibilidad a la hora de realizar el diseño. También, se mejora el rendimiento y la productividad de la aplicación, así como un mejor manejo y corrección de errores.

Por los motivos expuestos en los párrafos anteriores, la aplicación se ha desarrollado de manera modular. Existen diferentes módulos que forman parte de la aplicación, de tal forma que cada uno de ellos realiza una función independiente al resto. Los módulos en los que se ha dividido la aplicación son los siguientes:

- Módulos de guardado de ficheros.
- Módulos de carga de ficheros.
- Módulos de introducción de datos.
- Módulos de realización de cálculos.
- Módulos de representación del movimiento.

De todos estos, los módulos más importantes son los de realización de cálculos y representación del movimiento, ya que permiten realizar las principales funciones de la aplicación.

Módulo de introducción de datos:

Este módulo permite al usuario introducir todos los datos necesarios para realizar los cálculos. También, a diferencia de otras herramientas, permite al usuario elegir las unidades de los datos.

Como se han de introducir datos para el HUB, el satélite, el terminal VSAT, las frecuencias y el movimiento, el módulo está subdividido en cinco partes, correspondientes a los elementos enumerados anteriormente.

Módulo de guardado de ficheros:

Parte de la aplicación que permite al usuario guardar los datos previamente introducidos en un fichero de texto plano, de tal forma que en posteriores ejecuciones de la herramienta el usuario no tenga que introducir los mismos datos.

De la misma manera que el módulo de introducción de datos, este también está subdividido en cinco partes.

Módulo de carga de ficheros:

Permite al usuario cargar los datos de un fichero previamente guardado, de tal forma que pueda disponer de ellos para realizar cálculos. También está subdividido en cinco partes.

Módulo de realización de cálculos:

Dentro de este módulo se diferencian a su vez otros seis que permiten realizar los cálculos específicos de la aplicación. Son los siguientes:

- Módulo de cálculo de pérdidas.
- Módulo de cálculo de distancias.
- Módulo de cálculo de PIRE.
- Módulo de cálculos del *outbound*.
- Módulo de cálculos del *inbound*.
- Módulo de cálculos de la probabilidad de error de bit (BER).

El primero de ellos realiza el cálculo de las pérdidas, dependiendo de la opción elegida por el usuario y en función de una serie de parámetros. Análogamente para el módulo de cálculo de distancias y el módulo del cálculo de la PIRE.

Posteriormente, el módulo de cálculos del *outbound* y el módulo de cálculos del *inbound* realizan los cálculos principales, que son correspondientes al balance de enlace (explicados en “3.9 Formulación para el cálculo del balance de enlace en un sistema VSAT.”), incluyendo llamadas a los módulos anteriores, las cuales simplifican la manera de realizar los cálculos.

Por último el módulo de cálculo de probabilidad de error de bit realiza el cálculo de la misma. Para poder realizar el cálculo de la probabilidad de error, es necesario haber realizado previamente el cálculo del balance de enlace del *outbound* y del *inbound*.

Módulo de representación de movimiento:

El otro módulo principal es el de representación de movimiento, ya que es el que permite que la aplicación represente los mapas con las diferentes posiciones del terminal VSAT. Este módulo, a su vez, llama a los módulos de cálculos correspondientes para poder estudiar la evolución de los cálculos en función de la posición.

Por último, se representan en tres y dos dimensiones los resultados de los cálculos en función de la posición.

Todos los módulos descritos anteriormente están totalmente integrados en la aplicación y cohesionados entre sí.

A continuación se muestra un diagrama de bloques en el cual se pueden ver los distintos módulos existentes en la aplicación y la integración de los mismos.

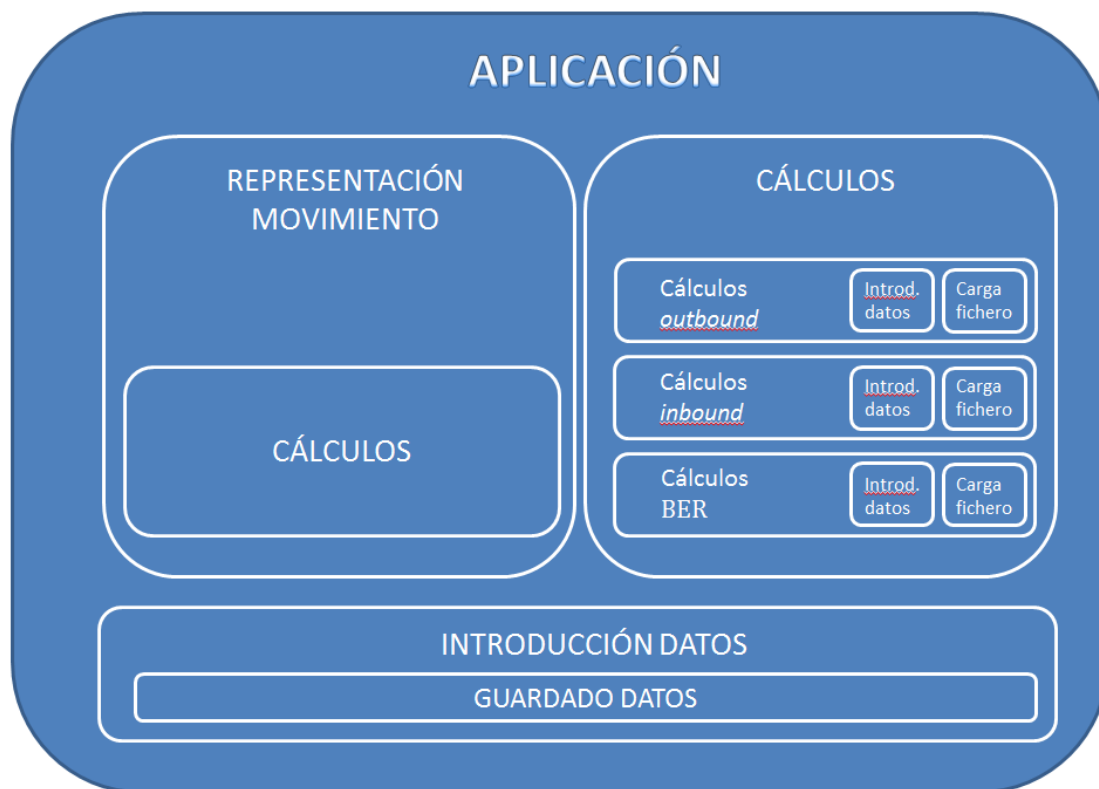


Imagen 22: Integración de los módulos de la aplicación.

A continuación se muestran los bloques de manera separada y la interacción entre ellos.

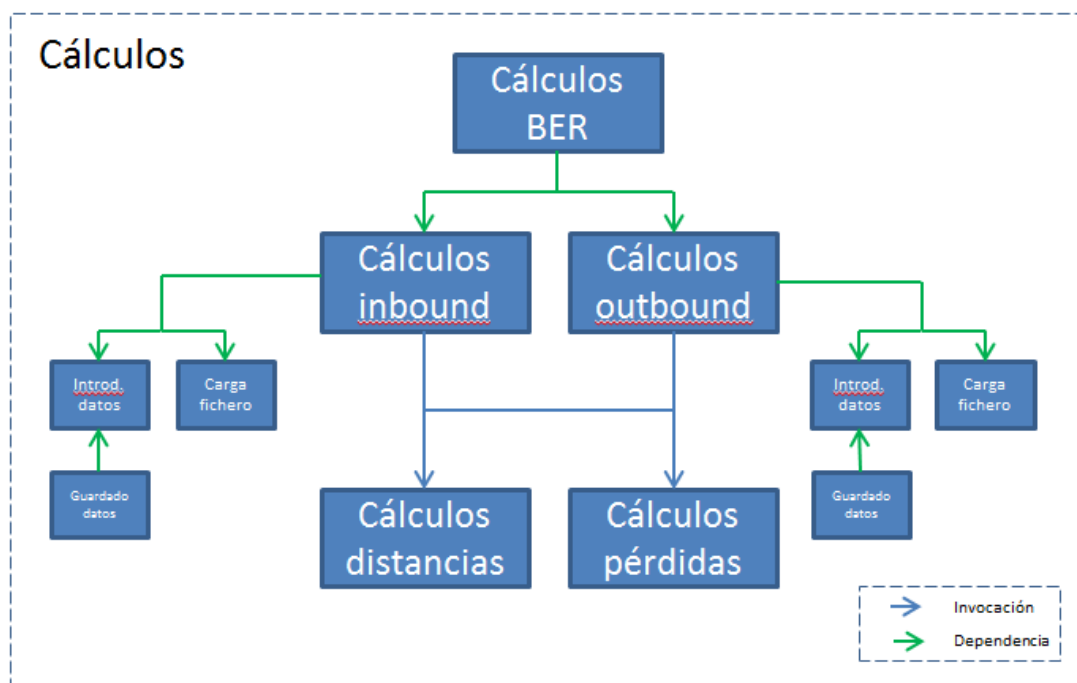


Imagen 23: Interacción y dependencia entre módulos.

Como se puede ver en la imagen, las flechas de color azul representan invocaciones a otros módulos, y las de color verde representan dependencia de otros módulos.

En la imagen anterior se ha representado el módulo de cálculos completo. En ella se puede observar lo que ya se ha mencionado anteriormente. Se realizan los cálculos del *outbound* y del *inbound*. Para realizar estos cálculos, a su vez se invocan a los módulos de cálculo de distancias y de cálculo de pérdidas, por eso se han unido con una flecha de color azul.

También se realizan los cálculos de la probabilidad de error de bit (BER). Para poder realizar el cálculo de este parámetro, es necesario tener el valor de la relación energía por bit a ruido de cada enlace, valor que se obtiene en los cálculos del *inbound* y del *outbound*, por este motivo, se han unido estos módulos con flecha verde, indicando dependencia.

Como la herramienta es interactiva el usuario puede seleccionar qué cálculos hacer y el orden en el que hacerlos. El único requisito es que para poder calcular la BER es necesario haber calculado previamente el balance de enlace del *outbound* e *inbound*, ya que en caso contrario se obtendrá un error.

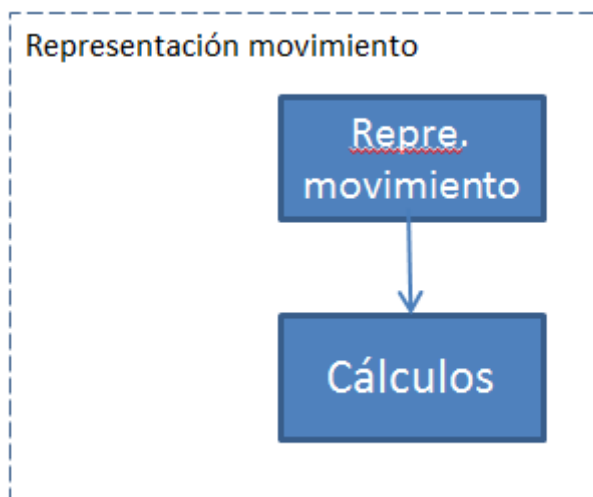


Imagen 24: Interacción y dependencia entre módulos (II).

Como ya se ha mencionado, el módulo de representación del movimiento del terminal VSAT realiza los cálculos del sistema en función de la posición, por lo que invoca al módulo de cálculos.

La imagen 25 representa el diagrama de flujo con lo que puede ser una ejecución en condiciones normales de la herramienta.

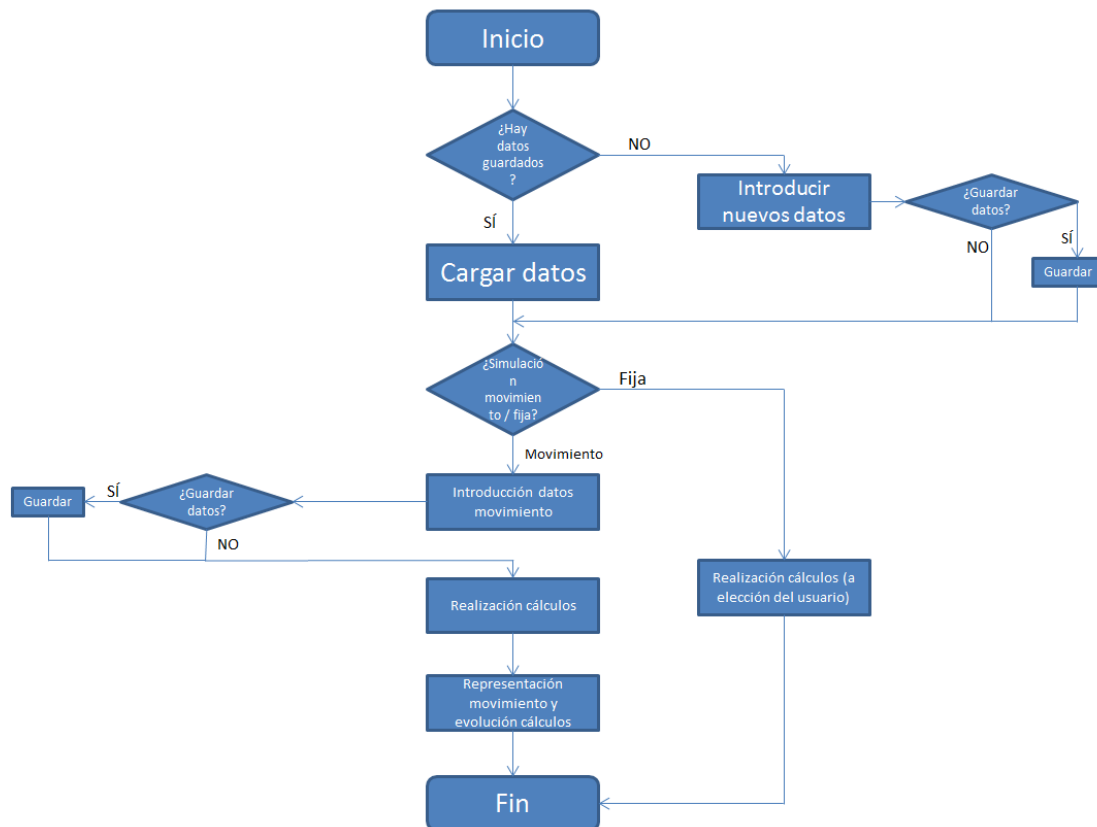


Imagen 25: Diagrama de flujo herramienta.

En una ejecución normal, al principio se pueden realizar dos opciones, o cargar datos –en el caso en que tengamos algún fichero con datos guardado– o introducir nuevos datos manualmente. Los datos que el usuario puede introducir son los del HUB, del satélite, del terminal VSAT y de las frecuencias. También el usuario puede elegir una serie de opciones, como el modelo de pérdidas a utilizar, la técnica de acceso múltiple o el tipo de multiplexación.

Una vez que se han introducido los datos, el usuario puede guardarlos –se han de guardar como un fichero de texto– para en futuras ocasiones cargarlos, o puede continuar con el flujo normal de la herramienta.

En este momento, el usuario ha de elegir entre realizar una simulación de un sistema en movimiento o de un sistema fijo. Como ya se ha mencionado, en el sistema en movimiento el terminal VSAT se encuentra en continuo movimiento, mientras que en el otro caso está fijo.

Si el usuario elige la opción del sistema fijo, tendrá la opción de elegir entre realizar los cálculos del *inbound*, del *outbound* y de la probabilidad de error de bit.

Después de eso, el usuario puede terminar la ejecución de la herramienta o puede seguir introduciendo datos y realizando cálculos, es decir, el flujo puede ir al fin de la ejecución o al inicio.

Por otro lado, si el usuario elige el caso del sistema en movimiento, en primer lugar ha de introducir los datos correspondientes al mismo. Como ya se ha mencionado, existen dos formas de introducir los datos del movimiento, a elección del usuario.

Una vez que el usuario ha introducido los datos del movimiento, puede guardarlos para facilitar una futura ejecución, o continuar.

Después de haber introducido los datos, se realiza la representación gráfica. La representación consiste en una ventana en la que aparece representado el mapa del mundo. En el mapa del mundo se pueden ver los puntos introducidos, correspondientes a las posiciones del terminal VSAT. Un ejemplo de esto se puede ver en la siguiente imagen:

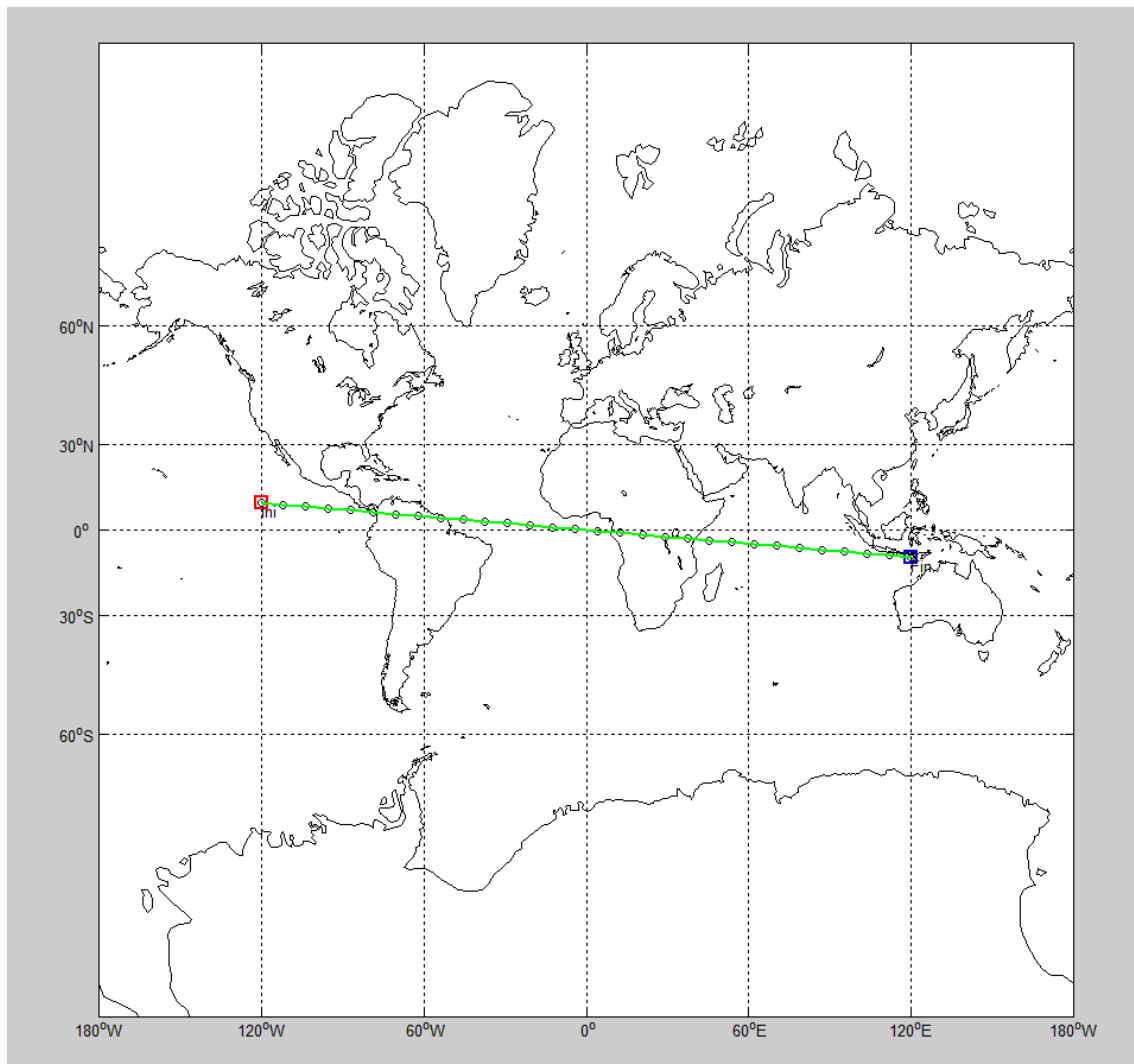


Imagen 26: Representación movimiento.

Por último, la herramienta realiza los cálculos del *inbound*, *outbound*, probabilidad de error de bit –en caso de que sea posible–, y ángulos de azimut y elevación y los representa en dos y tres dimensiones en función de la posición del terminal. En la siguiente imagen se puede ver la representación de los cálculos del *outbound* en función de la posición del terminal.

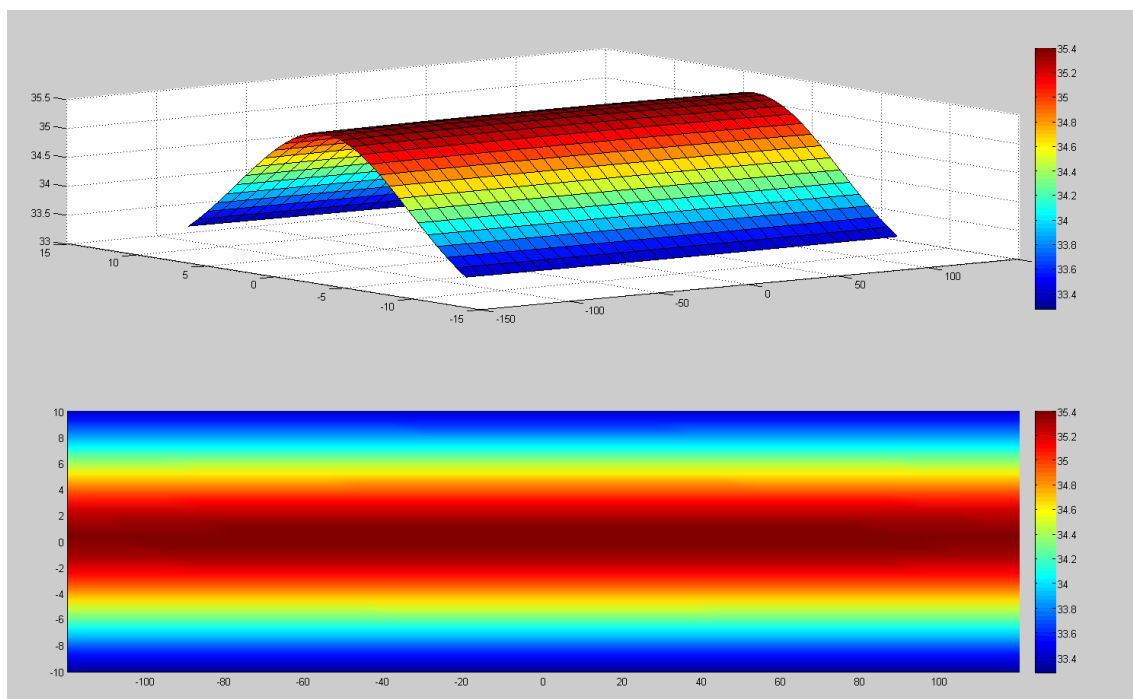


Imagen 27: Cálculos *outbound* en función de la posición.

En los anexos, se puede ver una guía de instalación y uso de la herramienta, y un ejemplo de ejecución.

4.2 Dificultades.

Durante el desarrollo de la aplicación, las mayores dificultades surgieron a la hora de simular la representación del movimiento del terminal VSAT.

Los módulos de introducción de datos, guardado y carga de ficheros y realización de cálculos no supusieron mayores dificultades, ya que MATLAB es una herramienta muy potente que te permite trabajar de manera gráfica con ficheros, por lo que el manejo de los mismos es relativamente sencillo.

En cambio, el desarrollo e implementación de la representación de movimiento si supuso mayores dificultades.

Uno de los problemas existentes es a la hora de tratar todos los datos del movimiento que se introducen manualmente. El usuario puede introducir hasta treinta y cinco puntos, que se corresponden con treinta y cinco longitudes y treinta y cinco latitudes, es decir, setenta datos solamente de las posiciones del terminal. Al ser una cantidad de datos relativamente alta, la probabilidad de equivocarse al tratarlos es alta.

Por otro lado, en MATLAB no es posible realizar una representación del mapa del mundo, algo necesario para la herramienta que se ha desarrollado. Por lo que para poder realizar la representación ha sido necesario utilizar funciones externas (scripts de representación de mapas p.e.) e incorporarlas a MATLAB.

Los scripts que se han utilizado para representar los mapas se pueden encontrar en el siguiente enlace:

<http://www2.ocgy.ubc.ca/~rich/map.html>

Por último, también se han encontrado dificultades a la hora de representar la evolución de los cálculos en función de la posición. Para poder realizar esto, es necesario trabajar con matrices, tanto estructurar los datos en forma de matrices y vectores, como realizar los cálculos con matrices y vectores. Afortunadamente, MATLAB permite realizar esto de manera muy eficiente, por lo que se ha podido subsanar esa dificultad.

4.3 Alternativas de diseño.

La aplicación se ha desarrollado en el lenguaje MATLAB, ya que es una herramienta matemática de amplio nivel, con una gran capacidad computacional que nos permite realizar los cálculos de una manera más efectiva y rápida que cualquier otro lenguaje de programación. También nos permite desarrollar aplicaciones gráficas e intuitivas, que es uno de los aspectos por los que se ha apostado a la hora de desarrollar esta aplicación.

Existen otros lenguajes de programación que se podían haber elegido como alternativas para desarrollar la herramienta, como Java, Visual Basic o .NET.

Estos lenguajes de programación resultan una alternativa válida para el desarrollo de la herramienta ya que permiten un manejo eficiente de la memoria del sistema y una mejor interfaz gráfica en comparación con MATLAB. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que presentan una serie de limitaciones en lo relativo al cálculo matemático que necesita el sistema, ya que no son lenguajes específicos para este fin.

También existen alternativas en la implementación del código. Algunas de las partes de la herramienta pueden ser programadas de una manera distinta, por ejemplo, utilizando otro tipo de bucles, otro tipo de control de flujo, de variables, etcétera.

Respecto al apartado gráfico, existen alternativas en la apariencia de la interfaz. Se podría haber diseñado y organizado de otra forma, pero se ha diseñado buscando una buena organización de los elementos que la componen, de tal forma que la apariencia final sea clara e intuitiva.

A la hora de realizar los cálculos, la forma general de hacerlos es utilizando la formulación del apartado “3.9 Formulación para el cálculo del balance de enlace en un sistema VSAT.”. No se deben utilizar otras fórmulas o simplificaciones de los cálculos, ya que podrían inducir a errores o imprecisiones.

Otras alternativas de diseño están relacionadas con la representación del movimiento del terminal. Podía haberse implementado de tal manera que la trayectoria fuese circular, o una parábola o hipérbola, pero se ha hecho de tal manera que la trayectoria del terminal sea una línea recta, ya que es la trayectoria más sencilla de implementar y analizar.

Una alternativa a introducir manualmente las longitudes y latitudes de las posiciones del terminal es elegir directamente sobre el mapa. Es una alternativa muy potente ya que facilita el manejo de la herramienta, y como se puede ver en el siguiente apartado, es una de las mejoras en las que se está trabajando.

Por último, existen alternativas relacionadas con la modularidad de la herramienta. Como ya se ha mencionado, la herramienta se ha diseñado de manera modular, de tal forma que se realicen funciones de manera independiente y posteriormente se integren todas. Se podía haber hecho un diseño sin módulos, de tal forma que todo se realizase en el mismo código fuente.

Se ha elegido diseñar la herramienta de manera modular ya que facilita el entendimiento y escritura del código, así como la reutilización del mismo, la localización y corrección de errores y la eficiencia en la ejecución.

4.4 Futuras mejoras.

Como ya se ha mencionado, la herramienta que se ha desarrollado es totalmente gratuita y de código abierto, por lo que cualquiera puede introducir mejoras y modificarla.

Para poder ejecutar la herramienta, es necesario tener los archivos fuente que la componen. Y al tener estos archivos, es posible modificarlos.

Se pueden introducir diferentes mejoras en la herramienta, unas relacionadas con añadir nuevas funcionalidades o mejorar algunas de las ya existentes, y otras relacionadas con mejorar la eficiencia de la aplicación.

Algunas de las mejoras que se pueden introducir son las siguientes:

- En cuanto a la representación manual del movimiento, una de las futuras mejoras consiste en permitir al usuario que se introduzcan más de treinta y cinco puntos. Podrían añadirse hasta cincuenta puntos o setenta y cinco puntos. Al hacer esto, se podría conseguir que los puntos fueran cada vez más cercanos entre sí, y por tanto los resultados que se obtendrían serían más precisos.
- También relativo a la representación manual del movimiento, una de las mejoras más novedosas consiste en permitir que el usuario elija directamente sobre el mapa del mundo los puntos. Es decir, en vez de tener que introducir las latitudes y las longitudes de manera numérica, esta nueva funcionalidad haría que apareciera el mapa del mundo, y el usuario pueda elegir los puntos manualmente haciendo click en las posiciones que desee del mapa. Con esta nueva funcionalidad se consigue una mayor interactividad con el usuario, que es uno de los objetivos fundamentales del trabajo.
- En cuanto a la representación tanto automática como manual del movimiento, otra de las mejoras consiste en que se muestren los resultados de manera gráfica cuando el usuario haga click sobre los puntos que desee. Actualmente cuando se realizan los cálculos en función de la posición, la herramienta

muestra una serie de gráficas que representan los cálculos y el usuario ha de interpretarlos. Con esta mejora, además de poder ver la evolución de manera gráfica, el usuario podrá ver los cálculos correspondientes a cada punto, con lo que conseguirá mayor información del sistema y tendrá un mayor control sobre él.

- Por último, existen mejoras relativas a la eficiencia de la herramienta. Estas mejoras consisten en introducir modificaciones en los archivos fuente de la aplicación, utilizar nuevas técnicas de programación, etcétera, de tal forma que se mejore la calidad del código.

5. Resultados y validación.

La aplicación desarrollada en este Trabajo Fin de Grado realiza una serie de cálculos en función de unos datos introducidos.

La forma de realizar los cálculos se ha formulado y se puede encontrar en el apartado 3.9 Formulación para el cálculo del balance de enlace en un sistema VSAT.

En este apartado, con el objetivo de validar la herramienta desarrollada, se utilizará la misma para resolver ejercicios reales y se compararán los resultados obtenidos con la herramienta y los obtenidos al resolver los casos de manera manual.

También se compararán los resultados obtenidos con la herramienta desarrollada y con otras herramientas disponibles en la red.

En primer lugar, se utilizarán de ejemplo los ejercicios resueltos durante el curso 2013-2014, de la asignatura “Sistemas de Telecomunicación” relacionados con sistemas VSAT. Posteriormente se utilizarán los ejercicios de exámenes disponibles de la Universidad Carlos III de Madrid, relacionados con sistemas VSAT y con cálculos de balance de enlace.

También, se utilizarán las herramientas accesibles y gratuitas descritas en el apartado “Estado del arte.” para resolver los mismos ejercicios. Por último, se compararán los resultados obtenidos con estas herramientas con los resultados obtenidos con la herramienta desarrollada.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para dos ejemplos concretos cuando se realizan los diferentes casos de estudio de forma manual y cuando se realizan con la aplicación.

5.1 Caso de estudio número uno.

El caso de estudio número uno corresponde al problema número dos del boletín de ejercicios del tema 5: Sistemas de comunicación por satélite, del curso 13/14 de la asignatura Sistemas de Telecomunicación, cursada en el Grado en Ingeniería de Sistemas de Comunicaciones.

El enunciado del caso de estudio número uno es el siguiente:

“Se desea diseñar una red VSAT bidireccional en estrella, apoyada en el satélite Hispasat (30 ° O), con funcionamiento en banda Ku. Tanto el Hub como las estaciones VSAT se encuentran en Madrid (40.5°N,3.5°O).

Los anchos de banda de RF necesarios son 200 KHz para el outbound y 50 KHz para el inbound.

El enlace ascendente del Outbound se realiza a 14100 MHz, mientras que el enlace descendente tiene lugar a 11800 MHz. En el inbound, la frecuencia para el enlace ascendente es de 14300 MHz y para el descendente 12000 MHz. El satélite tiene una PIRE de 44 dBW en un ancho de banda de 72 MHz y una G/T de 0 dB/K.

Tanto para el inbound como para el outbound se utiliza la modulación QPSK. La tasa binaria es de 128 kbps para el outbound mientras que es de 32 kbps para inbound.

Los parámetros del HUB son:

- Potencia transmitida: 27 dBW
- Pérdidas en los terminales: 2 dB tanto en transmisión como en recepción
- Antenas de 5 m de diámetro y 70% de eficiencia
- Temperatura de ruido del sistema: 200 K (después de las pérdidas en los terminales)

Los parámetros de las estaciones VSAT son:

- Potencia transmitida: 1 W
- Antena de 1 m de diámetro y 65% de eficiencia
- Pérdidas en los terminales: 1 dB tanto en transmisión como en recepción
- Temperatura de ruido del sistema: 200 K (después de las pérdidas en los terminales)

Se pide lo siguiente:

1. Para el enlace Outbound, determine la relación señal $\frac{C}{N_0}$ en el uplink y en el downlink
2. Determine la relación $\frac{E_b}{N_0}$ en el Outbound y la probabilidad de error de bit que se obtiene.
3. Repita los apartados anteriores para el enlace Inbound."

Si se utiliza la formulación que se ha expuesto en el apartado 6.8 y se realizan los cálculos, para el apartado número uno se obtienen los siguientes resultados:

- $\frac{C}{N_{0\uparrow}} = 102.40 \text{ dB/Hz}$
- $\frac{C}{N_{0\downarrow}} = 57.501 \text{ dB/Hz}$

Si se utiliza la aplicación desarrollada en el TFG, los resultados que se obtienen para el apartado número uno son los siguientes:

Resultados Outbound	
C/No Ascendente (dB/Hz)	C/No descendente (dB/Hz)
102.334	57.4598
C/No total (dB/Hz)	
57.4596	
Eb/No (Unidades naturales)	
4.35264	

Imagen 28: Resultados *outbound* con la herramienta del TFG.

Por lo que se puede ver que los resultados son muy similares.

Si se realiza el apartado número dos manualmente, el resultado que se obtiene es:

$$- \frac{C}{N_{0 \text{ total}}} = 57.4596 \text{ dBHz}$$

Por lo que también es similar al que se obtiene al hacer los cálculos con la aplicación.

El apartado número tres nos pide realizar los cálculos para el *inbound*. Los resultados que se esperan para este apartado son:

$$- \frac{C}{N_{0\uparrow}} = 62.051 \text{ dBHz}$$

$$- \frac{C}{N_{0\downarrow}} = 64.76 \text{ dBHz}$$

Si se realiza con la aplicación del TFG se obtienen los siguientes resultados:

Resultados Inbound	
C/No Ascendente (dB/Hz)	C/No descendente (dB/Hz)
62.0331	65.8125
C/No total (dB/Hz)	
60.5137	
Eb/No (Unidades Naturales)	
35.1741	

Imagen 29: Resultados *inbound* con la herramienta del TFG.

5.2 Caso de estudio número dos.

Los datos de los que se disponen para el caso de estudio número dos son los siguientes.

“Datos del HUB:

- *Puede dar servicio a 10 terminales VSAT*
- *PIRE = 20 dBW @ 6 MHz*
- *Diámetro de las antenas: 6 m*
- *Eficiencia de radiación: 85%*
- *Temperatura de las antenas: 250 K*
- *Posición: 40.2 ° N / 3.5 ° O*

Datos del satélite:

- *Posición: 30° O*
- *Altura del satélite: 35685 km*
- *Ancho de banda del transpondedor: 36 MHz*
- *PIRE: 30 dBW @ 36 MHz*
- *IBO: 3 dB*
- *OBO: 2 dB*
- *Diámetro de las antenas: 5 m*
- *Eficiencia de radiación de las antenas: 95%*
- *Temperatura de las antenas: 250 K*

Datos del terminal VSAT:

- *Posición: 40.2 ° N / 16.5 ° E*
- *Tasa de transmisión: 400 kbps*
- *Potencia de transmisión: 5 W*
- *Diámetro de las antenas: 2 m*
- *Eficiencia de radiación de las antenas: 70%*
- *Pérdidas de transmisión: 2 dB*
- *Pérdidas de recepción: 1 dB*
- *Temperatura de las antenas: 250 K*
- *Eficiencia espectral: 2 bps/Hz*

Las frecuencias utilizadas son las siguientes:

- *Outbound ascendente: 13 GHz*
- *Outbound descendente: 1.6 GHz*
- *Inbound ascendente: 12 GHz*
- *Inbound descendente: 1.5 GHz”*

Se pide

1. *Estudiar la relación portadora a ruido para el enlace outbound.*
2. *Calcular la probabilidad de error de bit.”*

Los resultados que se esperan para el primer apartado son:

- $\frac{C}{N_{0f}} = 66.974 \text{ dB/Hz}$
- $\frac{C}{N_{0l}} = 49.66 \text{ dB/Hz}$
- $\frac{C}{N_{0total}} = 49.57 \text{ dB/Hz}$

Si se realiza el estudio utilizando la aplicación, se obtienen los siguientes resultados:

Resultados Outbound	
C/No Ascendente (dB/Hz)	C/No descendente (dB/Hz)
66.9581	50.6379
C/No total (dB/Hz)	
50.5378	
Eb/no (Unidades naturales)	
0.282954	

Imagen 30: Resultados *outbound* caso de estudio número dos.

Si se hace el estudio del apartado número dos, el resultado para la probabilidad de error de bit esperado es:

- $BER = 2.57e-1 = 0.257$

Si utiliza la aplicación del TFG se obtiene el siguiente resultado:

BER_outbound =
0.2242

Imagen 31: Resultado BER caso estudio número dos.

Como se puede observar en ambas imágenes, el resultado que se obtiene al utilizar la aplicación es muy similar al esperado, tanto en este caso como en el caso anterior, por lo que la aplicación es bastante precisa. Las pequeñas discrepancias se deben a que en la realización manual, se han ido redondeando valores a medida que se iban realizando las operaciones, mientras que en la herramienta, no.

5.3 Comparación con otras herramientas.

Para poder dar una mayor validez a la herramienta, se intentará comparar con alguna de las otras herramientas que se han descrito en el apartado “Estado del arte.”

Por ejemplo, en el caso de las hojas de cálculo de Excel desarrolladas por la Universidad Politécnica de Valencia, la forma de introducir los datos es la siguiente:

ENLACE ASCENDENTE

ANTENA ESTACIÓN TERRENA		RECEPTOR SATELITE	
Frecuencia (MHz)	14000,00	PIRE Transmisor Estación Terrena (dBi)	61,11
Longitud de Onda	0,02	GANANCIA Receptor Satélite (dB)	31,81
Eficiencia antena (%)	64,00	Pérdidas en Espacio Libre (dB)	206,91
Eficiencia de spillover (%)	80,00	Pérdidas Adicionales (dB)	0,80
Eficiencia de apertura (%)	80,00	POTENCIA DE PORTADORA RECIBIDA (dB)	-114,73
Diámetro de Antena Transmisora (m)	1,80	Constante de Boltzman (dB/Hz°K)	-228,60
Abertura Efectiva de la Antena	1,63	Temperatura de Ruido de la Antena (°K)	300,00
Ganacia Antena máx.	44569,55	Pérdidas en la guía Receptor (dB)	1,00
Ganacia Antena máx. (dB)	46,49	Temperatura de ruido equivalente de la guía (°K)	295,00
		Ganancia del Amplificador LNA del Receptor (dB)	25,00
		Temperatura de ruido equivalente en el LNA (°K)	443,00
		Temperatura de ruido equivalente del Mezclador del Receptor (dB)	0,00
		Temperatura de ruido del Receptor Estación Terrena (dB/°K)	28,71
TRANSMISOR ESTACIÓN TERRENA		Ancho de Banda en Frecuencia Intermedia (dB/Hz) (36 MHz Trans.)	75,56
Potencia Transmitida (W)	29,00	POTENCIA DE RUIDO EN EL RECEPTOR (dB)	-124,33
PIRE (dBi)	61,11		
PÉRDIDAS		BALANCE DEL ENLACE	
Distancia Media Tierra-Satélite (Km)	37776,28	C/N (dB)	9,54
Pérdidas en Espacio Libre (dB)	206,91		
PÉRDIDAS ADICIONALES			
Pérdidas entre el transmisor y antena (Ltx) (dB)	0,00		
Pérdidas entre la antena y el receptor (Lrx) (dB)	0,00		
Pérdidas por despolarización (Lpol) (dB)	0,00		
Pérdidas por desapuntamiento antenas (Lpoint) (dB)	0,00		
Pérdidas por Atenuación Atmosférica (Lag) (dB)	0,80		
PÉRDIDAS TOTALES (dB)	207,71		

Imagen 32: Datos herramienta 1.

Y análoga para el enlace descendente. Como se puede ver, en la misma hoja se presenta el resultado del balance de enlace. El resultado total se presenta en otra hoja de cálculo, de la siguiente forma.

RELACIÓN POTENCIA DE PORTADORA/RUIDO TOTAL (dB)

9,5399

Imagen 33: Resultado balance enlace herramienta 1.

Para comparar los resultados se van a introducir los datos del caso de estudio número uno. En primer lugar, se realizará el cálculo del enlace *outbound* ascendente, es decir, el HUB será la estación terrena de transmisión y el satélite el receptor.

Una vez que se han introducido todos los datos posibles, el resultado es el siguiente:

BALANCE DEL ENLACE	
C/N (dB)	-13.04

Imagen 34: Resultado caso de estudio 1 utilizando herramienta 1.

Existe una diferencia importante, y es que esta aplicación realiza el cálculo de la relación $\frac{C}{N}$ (que tiene en cuenta el ancho de banda del enlace) y la herramienta del TFG realiza el cálculo de la relación $\frac{C}{N_0}$ (no tiene en cuenta el ancho de banda) por lo que los resultados son distintos.

Los resultados que se esperan para el caso de estudio número uno son:

- $\frac{C}{N_f} = 49.33 \text{ dB}$
- $\frac{C}{N_{0f}} = 102.40 \text{ dB/Hz}$

Como se puede observar, el resultado que se obtiene con las hojas de cálculo de la UPV es muy diferente al esperado (se obtiene un valor de $\frac{C}{N_f} = -13.04 \text{ dB}$ y se esperan 49,33 dB), en cambio, el resultado que se obtiene con la herramienta del TFG se corresponde con el esperado (se obtiene un valor de $\frac{C}{N_{0f}} = 102.334 \text{ dB/Hz}$ y el esperado son 102.40 dBHz).

En el caso del enlace *outbound* descendente (satélite → VSAT), no se puede realizar el estudio con las hojas de cálculo de la UPV, ya que no es posible introducir todos los datos necesarios.

Por tanto, ante esta situación se puede decir que las hojas de cálculo desarrolladas por la Universidad Politécnica de Valencia son una herramienta válida pero con limitaciones a la hora de estudiar los sistemas VSAT, ya que los resultados que obtienen no se corresponden con los que se deberían obtener, en cambio, con la herramienta que se ha desarrollado en el TFG sí se obtienen los resultados esperados (ver apartado 5.1). Estas hojas de cálculo ofrecen pocas posibilidades a la hora de introducir los datos. En cambio, la herramienta del TFG ofrece muchas más posibilidades y mucha más libertad. A continuación se puede ver una tabla que muestra una comparación entre ambas herramientas.

	Hojas de cálculo UPV	Herramienta TFG
Interactividad	Permite al usuario introducir los datos. Ofrece pocas opciones.	Ofrece muchas más opciones al usuario y más libertad para elegir, por lo tanto más interactiva.
Cantidad de datos	Se pueden introducir pocos datos. Poca libertad en este aspecto.	Se puede introducir un amplio abanico de datos. Más libertad en este aspecto.
Utilidad	No permite estudiar todos los casos posibles.	Permite estudiar un número de casos mayor.
Resultados	No se obtienen los resultados esperados.	Se obtienen los resultados esperados.
Apartado gráfico	Aspecto gráfico pobre. Se	Aspecto gráfico abundante. Más

Terminal A		
Parameter	Value	
Elevation	35.84	deg
Azimuth	217.51	deg
Path Loss	207.01	dB

Imagen 37: Resultados caso de estudio uno utilizando herramienta Satcoms UK (I).

Satellite		
Parameter	Value	
C/No Sat	132.39	dB/Hz
Req'd EIRP	NaN	dBm
% EIRP	NaN	%
Pwr @ Sat	-96.21	dBW

Imagen 38: Resultados caso de estudio uno utilizando herramienta Satcoms UK (II).

Terminal B		
Parameter	Value	
Rx Freq	14.03	GHz
C/No	NaN	dB/Hz
Elevation	35.84	deg
Azimuth	217.51	deg
Path Loss	206.97	dB

Imagen 39: Resultados caso de estudio uno utilizando herramienta Satcoms UK (III).

Como se puede observar en las imágenes, con la herramienta *Satellite Link Budget Calculators* se obtienen dos resultados de $\frac{C}{N_0}$, uno en el terminal de recepción y uno en el satélite.

El resultado esperado es $\frac{C}{N_{0T}} = 102.334 \text{ dB/Hz}$ y utilizando esta herramienta se obtiene un resultado de $\frac{C}{N_{0T}} = 132.39 \text{ dB/Hz}$, diferente al esperado. Esta diferencia se debe a que la herramienta *Satellite Link Budget Calculators* solamente deja introducir los datos más básicos, como PIRE, G/T y frecuencias.

Con esta herramienta tampoco se pueden analizar los sistemas VSAT, ya que los resultados que se obtienen no se corresponden con los deseados. En cuanto al aspecto gráfico, esta herramienta tiene una interfaz más intuitiva que las hojas de cálculo de Excel anteriores, pero

aun así, la herramienta desarrollada en el TFG muestra todo de manera más gráfica y más visual. Lo mismo ocurre para la interactividad. En este caso solamente se pueden introducir los datos, por lo que el usuario tiene poco poder de elección. En la herramienta desarrollada en el TFG el usuario tiene más posibilidad de elección. También, la cantidad de datos que se puede introducir en la herramienta del TFG es bastante mayor a la que se puede introducir en esta herramienta, por lo que los resultados serán más precisos en la herramienta del TFG.

	Herramienta Satcoms UK	Herramienta TFG
Interactividad	Ofrece pocas opciones.	Ofrece muchas más opciones al usuario y más libertad para elegir, por lo tanto más interactiva.
Cantidad de datos	Se pueden introducir pocos datos. Poca libertad en este aspecto.	Se puede introducir un amplio abanico de datos. Más libertad en este aspecto.
Utilidad	No permite estudiar todos los casos posibles.	Permite estudiar un número de casos mayor.
Resultados	No se obtienen los resultados esperados.	Se obtienen los resultados esperados.
Apartado gráfico	Aspecto gráfico pobre.	Aspecto gráfico abundante. Más visual, más representaciones.

Tabla 9: Comparación herramientas (II).

Por último, si estudiamos el caso número uno utilizando la herramienta *VSAT Link Budget Calculator*, se obtienen los siguientes resultados:

Transponder "gain" input PFD to output EIRP	44
Downlink frequency GHz	11.8
Downlink receive antenna diameter m	1
Downlink system noise temperature(antenna+LNA) K	200
Downlink receive antenna gain dBi	39.967338
Downlink receive antenna G/T dB/K	16.957038
Downlink satellite EIRP dBW	17.6527881600
Downlink path loss dB	205.52799
Downlink C/N dB	4.6715291
Uplink C/interference dB	28.0
Uplink C/N dB	104.80844
Satellite C/intermod dB	40
Downlink C/N dB	4.6715291
Downlink C/interference dB	20.0
Total link C/N dB	4.5252350

Imagen 40: Cálculo *outbound* caso estudio 1.

Uplink frequency GHz	14.1	Click to calculate results
Uplink antenna diameter m	5	
Uplink antenna transmit gain dBi	55.493480	
Uplink antenna, power at the feed W	12022644	
Uplink EIRP dBW	136.29348	
Range (35778 - 41679) km	38196	
Uplink path loss dB	207.07473	
Uplink pfd at satellite dBW/m ²	-26.34721	
Bandwidth Hz	200000	
Satellite uplink G/T dB/K	0	
Uplink C/N dB	104.80844	

Imagen 41: Cálculo *outbound* caso de estudio 1.

Los resultados que se esperan para el *outbound* de la relación $\frac{C}{N}$ son:

- $\frac{C}{N_{\uparrow}} = 49.33 \text{ dB}$
- $\frac{C}{N_{\downarrow}} = 4.46 \text{ dB}$

El caso del enlace descendente del *outbound* es muy similar, en cambio, para el enlace ascendente el resultado es muy diferente. Esta diferencia es debido a la PIRE del HUB. En realidad, la PIRE del HUB que se utiliza es de 80.8 dBW. En la herramienta, no es posible introducir la PIRE (*Uplink EIRP dBW*), sino que la obtiene con los datos metidos anteriormente. Si en vez del valor 136.29348 que aparece, estuviera el valor 80.8, y se hiciera la resta, se obtendrían 55.49348. Si se resta ese valor al de *Uplink C/N dB*, se obtiene 49.31496 dBW.

Es decir, se obtendrían unos resultados muy similares a los que se obtienen si se realiza de manera manual.

Esta herramienta es similar a la desarrollada en el TFG. No obstante, existen diferencias relativas a la interactividad y cantidad de datos, ya que el usuario simplemente puede introducir los datos y realizar los cálculos, mientras que en la herramienta del TFG el usuario dispone de más libertad.

En la herramienta *VSAT Link Budget Calculator*, la cantidad de datos que se puede introducir es pequeña, y se limita a los datos más básicos necesarios para realizar el cálculo del balance de enlace, mientras que en la herramienta del TFG se pueden introducir muchos más datos, con lo que se permite al usuario realizar cálculos más precisos y resolver más variedad de casos.

Los resultados que se obtienen utilizando esta herramienta si se corresponden con los esperados, por lo que esta herramienta tiene validez y permite estudiar los sistemas VSAT de manera correcta, aunque solamente casos más sencillos debido a la limitación de datos.

Respecto al apartado gráfico, la interfaz de usuario de esta herramienta es pobre, al contrario que en la herramienta del TFG.

Es decir, como conclusión, la herramienta que se ha desarrollado en el TFG es una herramienta realmente útil, ya que cubre una necesidad que hasta ahora no está cubierta por las aplicaciones existentes.

Como se puede ver en el apartado “Estado del arte.” y en este apartado, existen herramientas relacionadas, pero ninguna realiza las mismas funciones que la del TFG, ya que la mayoría de ellas no pueden estudiar todos los sistemas VSAT. Por otro lado, las herramientas relacionadas con el movimiento y seguimiento de sistemas, realizan el *tracking* del satélite, y no del terminal, que es lo que implementa esta herramienta, por lo que también es novedosa en ese aspecto.

Además, es una herramienta muy potente debido a su gran interactividad, a su facilidad de uso y a su fiabilidad.

Por estos motivos, y por la existencia de pocas herramientas docentes similares, la herramienta que se ha desarrollado es muy atractiva y realmente útil para las universidades.

6. Conclusiones.

Como se mencionaba en el apartado “1.2 Objetivos.”, el principal objetivo a la hora de realizar este Trabajo Fin de Grado era el de poder estudiar cualquier sistema de comunicaciones basado en redes VSAT, en términos de su relación portadora a ruido, relación energía por bit y ruido, y probabilidad de error de bit en función de una serie de parámetros y datos genéricos.

Para poder realizar el estudio de cualquier sistema VSAT, era necesario, en primer lugar, encontrar una formulación genérica común para todos los casos. En el apartado “3.9 Formulación para el cálculo del balance de enlace en un sistema VSAT.” se expone la formulación necesaria para realizar los cálculos, por lo que este objetivo marcado al inicio se ha cumplido.

Esta formulación es la que se ha implementado y es en la que se basa la aplicación para realizar todos los cálculos. Como se ha descrito en el apartado “4 Descripción de la aplicación.” la aplicación desarrollada permite calcular la relación portadora a ruido, la relación energía por bit a ruido y la probabilidad de error de bit, parámetros con los que se puede estudiar y evaluar la calidad del enlace.

Además, para dar veracidad y validez a los resultados obtenidos por la aplicación, se han utilizado casos reales y casos ya resueltos. Estos casos se pueden ver en el apartado “5 Resultados y validación.”

Otro de los objetivos planteados a la hora de empezar a realizar este Trabajo Fin de Grado era que la aplicación a desarrollar fuera lo más gráfica, interactiva y cómoda posible para el usuario.

Para poder cumplir este objetivo, la aplicación muestra cuadros de diálogo informando de errores y de la situación del programa. También, existen muchas ventanas y botones para que el manejo de la aplicación sea intuitivo y sencillo, por lo que se ha cumplido este objetivo planteado al inicio.

El último objetivo planteado al comienzo, era el poder representar el movimiento de un terminal VSAT y poder ser capaces de calcular el balance de enlace y estudiar la calidad del mismo en función de la posición del terminal.

Este objetivo también se ha cumplido, ya que la aplicación permite simular el movimiento del terminal de dos maneras distintas, y en ambas se puede estudiar la calidad del enlace. También, la aplicación permite determinar la zona de cobertura del sistema gracias al cálculo de los ángulos de elevación y de azimut en todas las posiciones de la trayectoria.

Por tanto, se puede decir que con la realización de la aplicación se han cumplido todos los objetivos que se habían planteado al comienzo.

6.1 Presupuesto.

A continuación se detalla el presupuesto que ha sido necesario para llevar a cabo la realización de este Trabajo Fin de Grado.

Para poder realizar este Trabajo Fin de Grado, solamente se ha necesitado lo siguiente:

- Licencia de MATLAB, para poder desarrollar la aplicación.
- Licencia de Microsoft Office, para poder escribir la memoria del Trabajo Fin de Grado.
- Ordenador de gama media-alta en el cual desarrollar la aplicación y escribir la memoria.
- Trabajo humano, de la persona que ha realizado el trabajo, y del tutor. Para realizar este cálculo, se utilizarán como referencia los 178 días que se ha tardado en realizar el trabajo, a 5h diarias de media, multiplicado por el precio por hora del alumno. Por otro lado se hará el mismo cálculo para el tutor del Trabajo Fin de Grado, teniendo en cuenta que ha participado en el 10 % de las horas totales del alumno.
- Costes indirectos, como electricidad, acceso a internet, alquiler, etcétera. Este tipo de costes se ha contabilizado como un 21 % sobre el total.

Si presentamos estos datos en una tabla,

Material	Precio
Licencia MATLAB	35 €
Licencia Office (Microsoft Office Universitario)	20 €
Recursos Humanos: <ul style="list-style-type: none">○ Alumno (30€/hora)○ Tutor (60€/hora)	<ul style="list-style-type: none">○ Alumno: 26700 €○ Tutor: 5340 €
Ordenador	500 €
Costes indirectos (electricidad)	6844.95 €
TOTAL	39439.95 €

Tabla 10: Presupuesto

Como se puede ver en la tabla, el presupuesto total necesario para la realización de este Trabajo Fin de Grado es de treinta y nueve mil cuatrocientos treinta y nueve con noventa y cinco euros.

Firmado: Javier Hernández Álvarez

Anexos.

Anexo 1: Guía detallada de instalación y uso de la herramienta.

En primer lugar, para poder utilizar la aplicación es necesario tener una instalación de MATLAB. La versión utilizada para el desarrollo de la aplicación es la r2010a, por lo que para que funcione la aplicación es necesario tener esta versión o cualquiera superior.

Una vez que se tiene instalado MATLAB y está disponible para su uso, se ha de configurar el directorio de trabajo en el cual se encuentran los diferentes scripts que componen la aplicación.

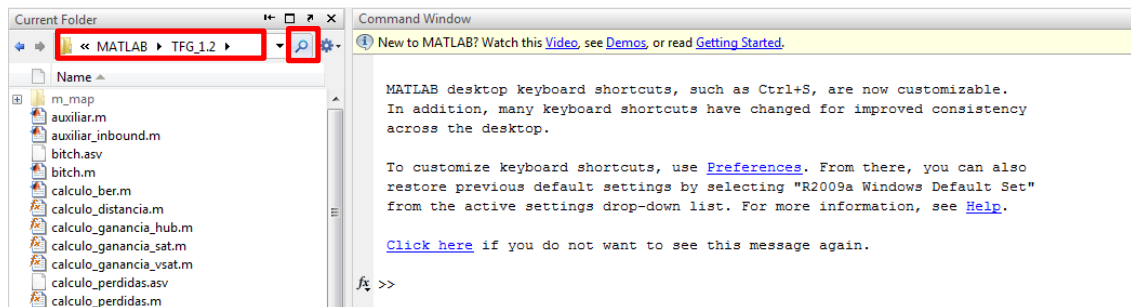


Imagen 42: Configuración workspace MATLAB.

Para configurar el directorio de trabajo, tenemos que hacer click sobre el espacio en blanco que hay situado donde indica el recuadro rojo. Una vez que se ha hecho click ahí, se puede introducir manualmente la ruta en la cual se encuentran los ficheros.

La otra manera de configurar el directorio de trabajo es haciendo click en la lupa –recuadrada en rojo–. Al hacer click en el icono de la lupa, también se permite al usuario escribir la ruta. Una vez introducida ya está configurado el espacio de trabajo y ya se puede ejecutar la aplicación.

Para ejecutar la aplicación, tiene que llamarse al script principal que la lanza. Para ello, se ha de escribir en el espacio de trabajo de MATLAB el nombre del script, que en este caso es “vsat_aplicacion” y con eso se inicia la ejecución de la aplicación, tal y como se puede observar en las siguientes imágenes.

```
MATLAB desktop keyboard shortcuts, such as Ctrl+S, are now customizable.
In addition, many keyboard shortcuts have changed for improved consistency
across the desktop.

To customize keyboard shortcuts, use Preferences. From there, you can also
restore previous default settings by selecting "R2009a Windows Default Set"
from the active settings drop-down list. For more information, see Help.

Click here if you do not want to see this message again.

>> vsat_aplicacion
```

Imagen 43: Lanzamiento aplicación.

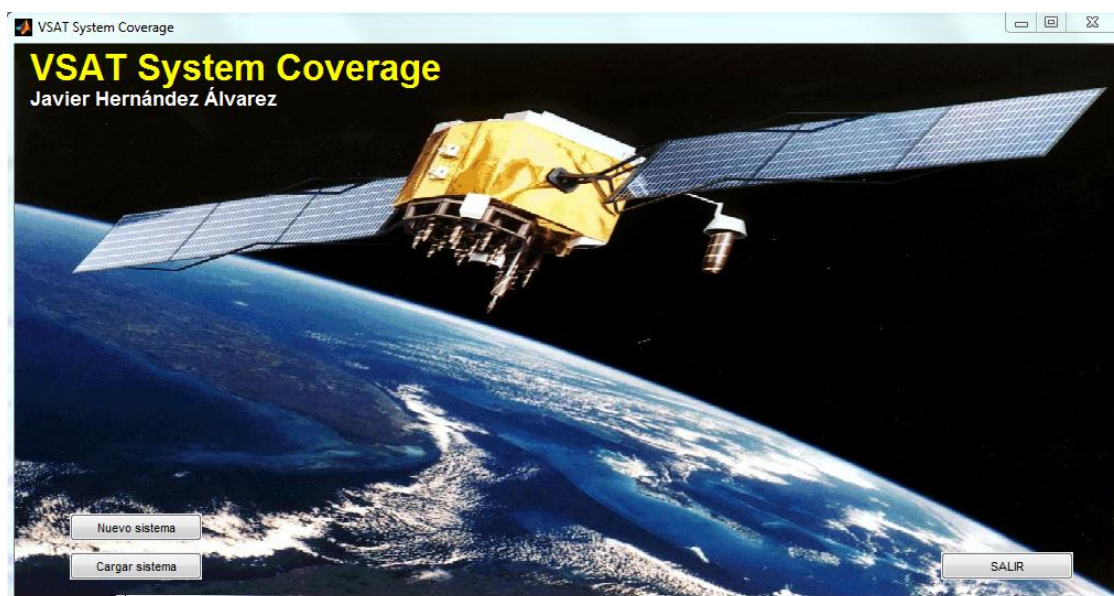


Imagen 44: Pantalla principal aplicación.

La imagen anterior es la pantalla principal de la aplicación. En ella, aparece el nombre de la aplicación –*VSAT System Coverage*– y aparecen una serie de botones con las acciones que se pueden realizar.

En la parte inferior izquierda de la pantalla principal, aparecen dos botones:

- Nuevo sistema.
- Cargar sistema.

En la parte inferior derecha de la pantalla aparece el botón “SALIR”. Si se pulsa este botón, se abre una ventana de diálogo que pregunta si en realidad se quiere salir de la aplicación. En caso afirmativo se cierra la aplicación, y en caso negativo se mantiene la pantalla principal de la aplicación.

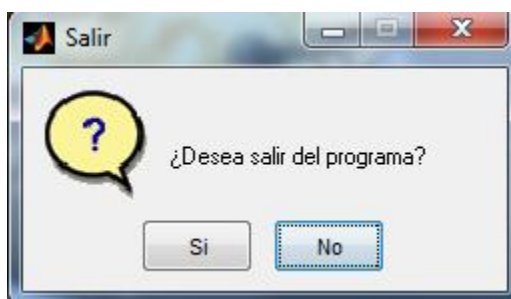


Imagen 45: Cuadro de diálogo salida.

Si se pulsa el botón “Nuevo sistema”, se cierra la pantalla principal de la aplicación y se abre una nueva ventana, en la que se ve un diagrama que representa el sistema VSAT y en la que aparecen diferentes botones para elegir los datos que se quieren introducir, cargar o guardar. Asimismo, en la esquina superior derecha aparecen las distintas opciones que tiene el usuario, que son:

- Realizar los cálculos del enlace *outbound*.
- Realizar los cálculos del enlace *inbound*.
- Realizar los cálculos de la probabilidad de error de bit (BER).
- Introducir la trayectoria del terminal VSAT.

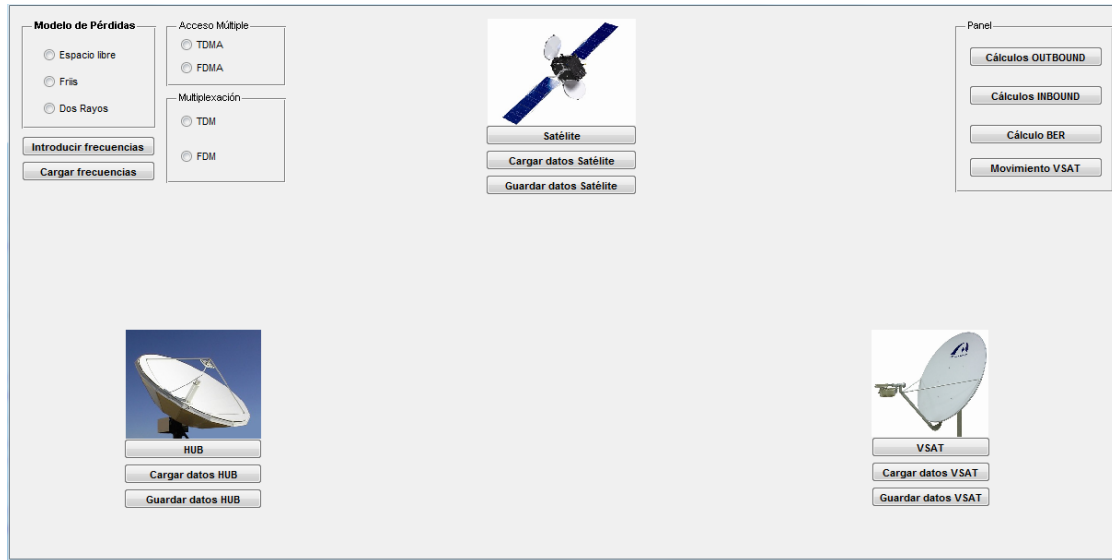


Imagen 46: Nuevo sistema.

Si se pulsa el botón “Cargar sistema”, se abre una ventana de exploración de ficheros, a través de la cual podemos cargar un fichero que tenga guardados todos los datos del sistema, es decir, que tenga guardados los datos del terminal VSAT, del satélite y del HUB. Una vez que se han cargado los datos del sistema, aparece una pantalla de diálogo informando de que se ha realizado correctamente la carga, y posteriormente se abre la pantalla que aparece en la imagen anterior para que el usuario elija una acción a realizar.

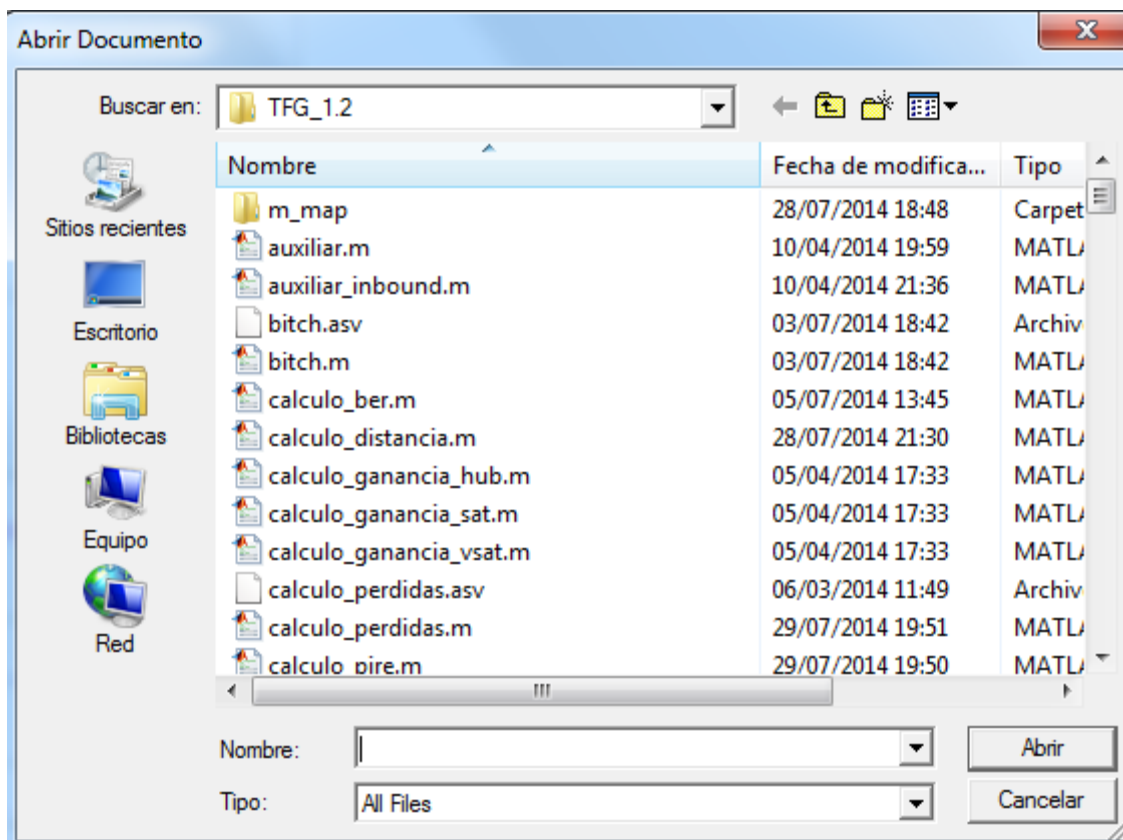


Imagen 47: Carga sistema.

En la pantalla que aparece en la Imagen 46 se pueden introducir todos los datos del sistema. De tal forma que sea más cómodo para el usuario, se introducen los datos del satélite, HUB y terminal VSAT de forma separada. Para que el usuario pueda introducir los datos, ha de pulsar en el botón correspondiente (HUB, satélite y VSAT respectivamente).

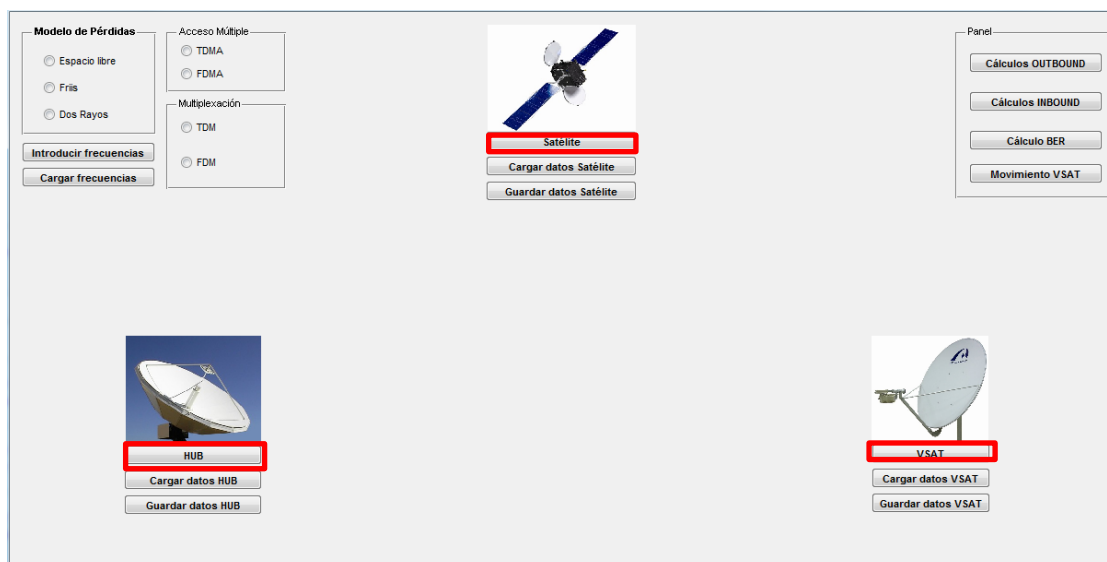


Imagen 48: Como introducir datos.

Cuando se pulsán los botones de introducir datos, se abre una nueva pantalla (también se mantiene la anterior, para posteriormente elegir las acciones a realizar) en la que se pueden introducir los diferentes datos.

Para cada entidad (HUB, satélite y terminal VSAT) existen diferentes datos, tal y como se puede ver en las siguientes imágenes.

The screenshot shows a software window titled 'datos_hub' with a standard Windows-style title bar. The main content area is titled 'Datos HUB' and contains various input fields and unit selection menus for configuring a hub. The fields and menus are organized as follows:

- Temperatura de antena (K)**: A text input field.
- Diámetro antenas**: A text input field.
- Unidades** (for antenna diameter): A menu with radio buttons for 'm' and 'cm'.
- Eficiencia radiación**: A text input field.
- Latitud**: A menu with radio buttons for 'Norte' and 'Sur', followed by a text input field.
- Longitud**: A menu with radio buttons for 'Este' and 'Oeste', followed by a text input field.
- Codificación**: A menu with radio buttons for 'QPSK', 'BPSK', '4-QAM', and '16-QAM'.
- Eficiencia espectral (b/Hz)**: A text input field.
- Tasa de transmisión**: A text input field.
- Unidades** (for transmission rate): A menu with radio buttons for 'bps', 'kbps', and 'Mbps'.
- Tasa de codificación**: A text input field.
- PIRE**: A text input field.
- Unidades** (for PIRE): A menu with radio buttons for 'W', 'mW', 'dBW', and 'dBm'.
- @**: A text input field.
- Ganancia en recepción**: A text input field.
- Unidades** (for reception gain): A menu with radio buttons for 'W', 'mW', 'dBW', and 'dBm'.
- Ancho de banda/Hub**: A text input field.
- Unidades** (for bandwidth): A menu with radio buttons for 'KHz', 'MHz', and 'GHz'.

Imagen 49: Datos HUB.

datos_satelite

Datos satélite

Ancho de banda del transpondedor **Unidades**

☐ KHz
☐ MHz
☐ GHz

PIRE **Unidades**

☐ W
☐ mW
☐ dBW
☐ dBm

Diámetro antenas **Unidades**

☐ m
☐ cm

Ganancia en recepción **Unidades**

☐ W
☐ mW
☐ dBW
☐ dBm

Eficiencia radiación

Temperatura de antena (K)

IBI

Latitud

☐ Norte
☐ Sur

Longitud

☐ Este
☐ Oeste

OBO

Altura del satélite **Unidades**

☐ km
☐ m

Codificación

☐ QPSK
☐ BPSK
☐ 4-QAM
☐ 16-QAM

Tasa de codificación

Tasa de transmisión **Unidades**

☐ bps
☐ kbps
☐ Mbps

Imagen 50: Datos satélite.

Datos VSAT

Número de terminales VSAT

PIRE @

Unidades: ☐ W, ☐ mW, ☐ dBW, ☐ dBm

Unidades: ☐ KHz, ☐ MHz, ☐ GHz

Unidades: ☐ W, ☐ mW, ☐ dBW, ☐ dBm

Diámetro antenas Unidades: ☐ m, ☐ cm

Eficiencia radiación

Latitud: ☐ Norte, ☐ Sur,

Longitud: ☐ Este, ☐ Oeste,

Ganancia en recepción

Temperatura de antena (K)

Tasa de codificación

Ancho de banda/VSAT Unidades: ☐ KHz, ☐ MHz, ☐ GHz

Codificación: ☐ QPSK, ☐ BPSK, ☐ 4-QAM, ☐ 16-QAM

Eficiencia espectral

Tasa de transmisión Unidades: ☐ bps, ☐ kbps, ☐ Mbps

Imagen 51: Datos terminal VSAT.

Para introducir los datos, se ha de pulsar sobre el cuadro del dato correspondiente e introducir el valor deseado. También, en los casos en los que los datos lleven unidades asociadas, se puede elegir cual es la unidad que se quiere utilizar pulsando sobre el botón correspondiente.

Todos los datos presentan bastante robustez, de tal forma que cuando el usuario introduce un dato que no es lógico, por ejemplo, una eficiencia de radiación menor que 0 o mayor que 1, se muestra un aviso por pantalla indicando que no es correcto, que se ha de introducir otro dato diferente, tal y como se puede observar en la siguiente imagen.

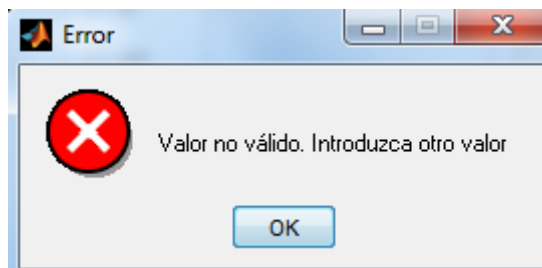


Imagen 52: Mensaje de error.

Por otro lado, para facilitar la comodidad al usuario y que éste no tenga que introducir datos cada vez que quiera hacer pruebas, se pueden guardar los datos introducidos y posteriormente cargarlos.

Para guardar los datos es necesario haberlos introducido primero. Una vez que se han introducido todos los datos correspondientes de una entidad, en la pantalla que muestra la Imagen 46 se ha de hacer click sobre el botón correspondiente de guardado. Por ejemplo, se utilizará un caso en el que se introducen los siguientes datos para el terminal VSAT:

- Número de terminales = 10.
- PIRE = 20 dbW @ 20 MHz.
- Diámetro antena = 2m.
- Eficiencia de radiación = 95%.
- Temperatura de antena = 200K
- Tasa de transmisión = 4kbps
- Eficiencia espectral = 2 bits/Hz

Datos VSAT

Número de terminales VSAT:

PIRE: @

Diámetro antenas: Unidades: ☒ m ☐ cm

Eficiencia radiación:

Latitud: ☒ Norte ☐ Sur

Longitud: ☒ Este ☐ Oeste

Ganancia en recepción:

Temperatura de antena (K):

Tasa de codificación:

Ancho de banda/VSAT: Unidades: ☐ KHz ☐ MHz ☐ GHz

Codificación: ☒ QPSK ☐ BPSK ☐ 4-QAM ☐ 16-QAM

Eficiencia espectral: Unidades: ☐ bps ☒ kbps ☐ Mbps

Tasa de transmisión:

Imagen 53: Ejemplo datos VSAT.

Ahora que ya se han introducido los datos, volvemos a la pantalla de la Imagen 46 y hacemos click en “Guardar datos VSAT”

Al hacer click en guardar datos, se nos abre una ventana diálogo preguntándonos el directorio y el nombre que queremos darle al fichero. Por ejemplo, en este caso le llamaremos “prueba_VSAT.txt”

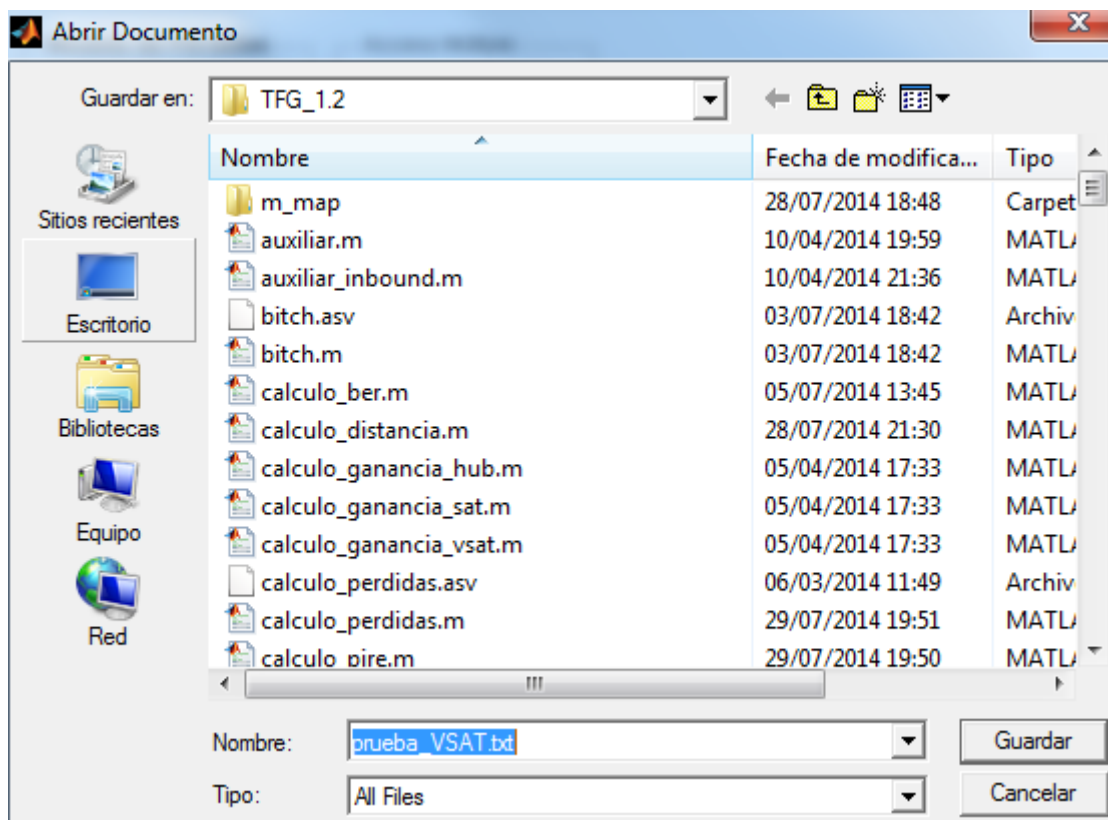


Imagen 54: Guardado fichero.

Se hace click sobre Guardar, y si se guarda el fichero correctamente nos sale el siguiente aviso.

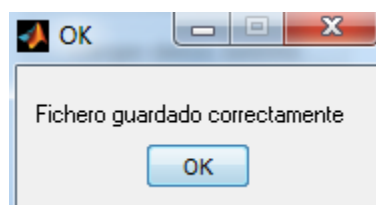


Imagen 55: Cuadro diálogo fichero guardado.

Si vamos al directorio en el que se nos ha guardado el fichero, y lo abrimos, vemos que se guardan los datos de la siguiente manera.

```
PIRE 20
BW_Referencia 20000000
Numero_terminales 10
Diametro_antena 2.000000
Eficiencia_radiacion 0.950000
Temp 200
Eficiencia_espectral 2.000000
Tasa_transmision 4000
```

Imagen 56: Datos guardados.

Una vez que se han guardado los ficheros con los datos correspondientes, se pueden cargar, para que así no sea necesario introducirlos otra vez manualmente.

Para cargar los datos procedentes de un fichero, tenemos que hacer click sobre el botón, “Cargar datos ---”, dependiendo de si queremos cargar los datos del hub, los del satélite o los del terminal VSAT.

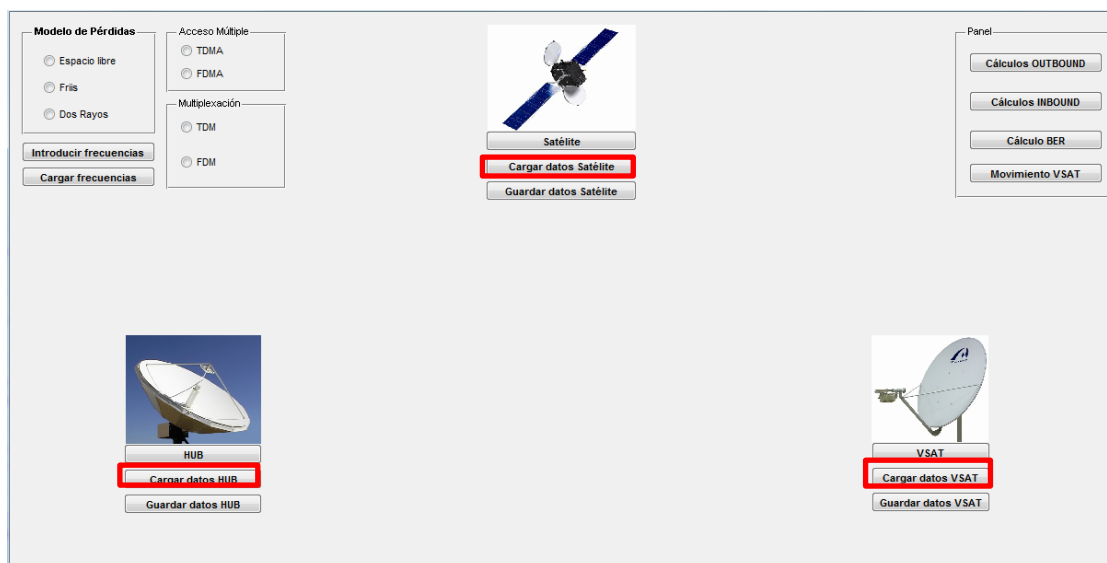


Imagen 57: Cargar datos.

Cuando hacemos click sobre cualquiera de los botones de cargar datos, se nos abre una nueva ventana del explorador para que el usuario pueda seleccionar el fichero que desea cargar. Si el fichero se carga correctamente, aparecerá una ventanita informando de que la carga se ha realizado correctamente, y el usuario podrá ver en el espacio de trabajo de Matlab los valores que se han cargado.

Una vez que se han introducido los datos del hub, del satélite y del terminal VSAT, es necesario que el usuario introduzca los datos de las frecuencias y elija un modelo de pérdidas para poder realizar los cálculos. Esto se puede hacer desde la esquina superior izquierda de la pantalla que se muestra en la Imagen 46.



Imagen 58: Introducción frecuencias.

Se han implementado distintos modelos de pérdidas, que se pueden ver en las imágenes anteriores. El modelo de pérdidas en espacio libre se ha explicado en el apartado 6.8, el otro modelo se encuentra explicado en el anexo. Para poder realizar todos los cálculos, es necesario elegir un modelo de pérdidas, ya que en caso contrario, al realizar los cálculos se producirá un error.

También es necesario introducir las frecuencias a las que se va a trabajar. Para ello, se debe hacer click sobre el botón “Introducir frecuencias” que se puede observar en las imágenes. Cuando se hace click sobre ese botón, se abre una nueva ventana en la que se permite al usuario introducir los datos para las siguientes frecuencias:

- Frecuencia ascendente outbound.
- Frecuencia descendente outbound.
- Frecuencia ascendente inbound.
- Frecuencia descendente inbound.

The screenshot shows a window titled 'eleccion_frecuencias' with a subtitle 'Elección de frecuencias'. It contains four sections arranged in a 2x2 grid. The top-left section is labeled 'OUTBOUND' and contains a button labeled 'Ascendente' and three radio buttons for 'KHz', 'MHz', and 'GHz'. The top-right section is labeled 'INBOUND' and contains a button labeled 'Ascendente' and three radio buttons for 'KHz', 'MHz', and 'GHz'. The bottom-left section is labeled 'OUTBOUND' and contains a button labeled 'Descendente' and three radio buttons for 'KHz', 'MHz', and 'GHz'. The bottom-right section is labeled 'INBOUND' and contains a button labeled 'Descendente' and three radio buttons for 'KHz', 'MHz', and 'GHz'. At the bottom right of the window, there is a button labeled 'Guardar frecuencias' which is highlighted with a red rectangle.

Imagen 59: Introducción frecuencias.

De la misma manera que ocurre con los datos del hub, satélite o terminal VSAT, también se pueden guardar los datos de las frecuencias para posteriormente cargarlos y que no tengan que ser introducidos manualmente. Para guardar los datos de las frecuencias, en esta misma pantalla se pulsa al botón “Guardar frecuencias”, que se puede ver en la imagen anterior.

Al igual que ocurre a la hora de guardar los datos del hub, del satélite y del terminal VSAT, en este caso también se abre una nueva ventana en la que se puede introducir el nombre del fichero y elegir el directorio en el cual se quiere guardar.

También, como se puede observar en la Imagen 46 se pueden elegir distintas opciones de acceso múltiple y de multiplexación, que influirán a la hora de realizar los cálculos.

Una vez que se han introducido todos los datos necesarios, se pueden realizar los cálculos. Para ello, se ha de pulsar sobre los botones “Cálculos *OUTBOUND*”, “Cálculos *INBOUND*” y “Cálculo BER”.

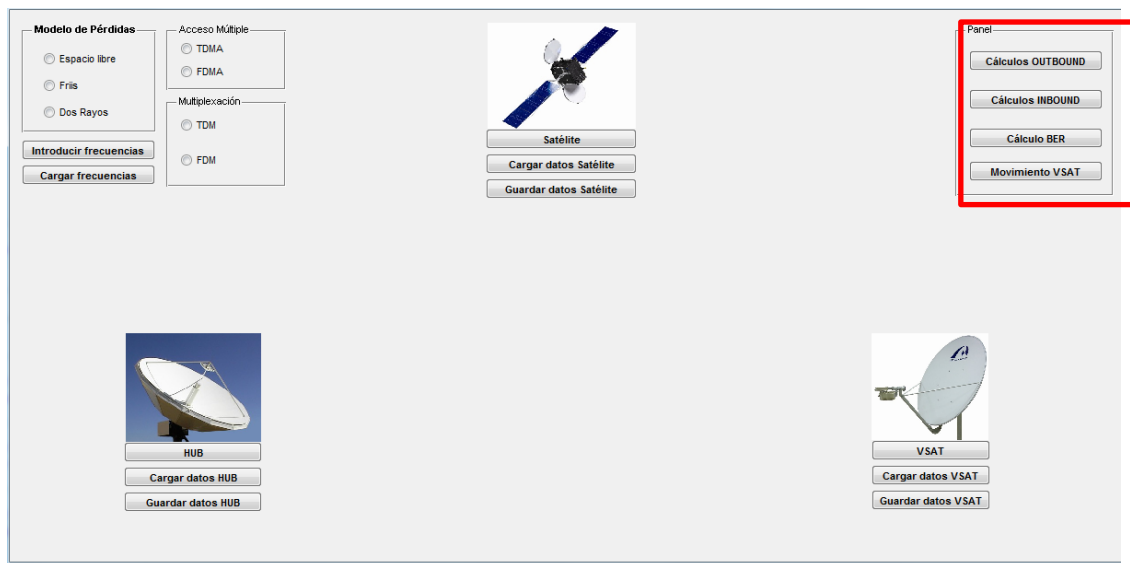


Imagen 60: Opciones del usuario.

Si se elige la primera opción que viene, “Cálculos *OUTBOUND*”, se utilizan los datos introducidos anteriormente para realizar los cálculos necesarios y obtener el valor de la relación portadora a ruido para el enlace outbound.

En caso de que se necesite algún dato que no ha sido introducido, se obtendrá un error en la pantalla de trabajo de MATLAB, y también se abrirá un cuadro de diálogo informando al usuario del error y del dato que se necesita.

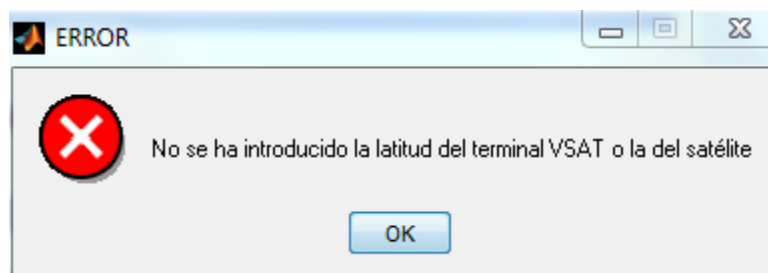


Imagen 61: Error por falta de datos.

En el caso de que todos los datos necesarios estén introducidos y se pueda proceder a realizar los cálculos para el balance de enlace del outbound (tal y como se indica en las ecuaciones 59 y 61) se realizarán los cálculos.

Una vez realizados los cálculos del *outbound*, se abre una nueva ventana en la que se informa al usuario del valor que tiene para esos datos, la relación portadora a ruido del enlace *outbound* ascendente, del enlace descendente, y la relación portadora a ruido total para el *outbound*, tal y como se puede observar en la siguiente imagen.

resultado_outbound

Resultados Outbound

C/No Ascendente 47.8682	C/No descendente 35.5778
C/No total 83.446	
eb/no	

Imagen 62: Resultados *outbound*.

Este procedimiento es análogo para el enlace *inbound*. Es decir, si con los datos que se han introducido es posible realizar los cálculos del balance de enlace la aplicación procederá a realizarlos, y posteriormente se abrirá una nueva ventana en la cual se mostrarán los resultados para el enlace *inbound*, tanto ascendente, como descendente, como para el total.

resultado_inbound

Resultados Inbound

C/No Ascendente 58.9532	C/No descendente 38.7525
C/No total 97.7057	
eb/no	

Imagen 63: Resultados *inbound*.

En el caso contrario, también se mostrará un error, explicando que no se tienen los datos necesarios para realizar el cálculo.

Por último, el usuario tiene la opción de realizar el cálculo de la probabilidad de error de bit (BER). Para poder realizar este cálculo, es necesario que se haya calculado previamente la relación energía por bit y ruido $\frac{e_b}{n_0}$ (en unidades naturales), que también se obtiene cuando hacemos click en “Cálculos OUTBOUND” o en “Cálculos INBOUND”.

En este caso, también es necesario que se haya elegido una modulación. En esta aplicación solamente se han implementado las modulaciones BPSK, QPKS, 4-QAM y 16-QAM, ya que son las más comunes y más utilizadas. Es necesario que se haya elegido una modulación, ya que el cálculo de la probabilidad de error de bit es diferente para cada modulación, tal y como se ha mostrado en el apartado “3.9 Formulación para el cálculo del balance de enlace en un sistema VSAT.”.

De la misma manera a los cálculos del *outbound* y del *inbound*, si no se dispone de los datos necesarios, se obtendrá un error y se abrirá un cuadro de diálogo informando del mismo al usuario, como se ha mostrado en los casos anteriores.

Por el contrario, si se tienen todos los datos necesarios, se realizará el cálculo de la probabilidad de error de bit, e igual que en los supuestos anteriores, se abrirá una nueva ventana en la cual se podrá ver el resultado.

Por último se tiene la opción de introducir el movimiento del terminal VSAT. Para ello el usuario ha de hacer click sobre el botón “Movimiento VSAT”. Cuando se hace click en ese botón se muestra la siguiente pantalla:

The screenshot shows a window titled "POSICIÓN VSAT". It has four main input sections: "Latitud Inicial", "Latitud Final", "Longitud Inicial", and "Longitud Final". Each section contains two radio buttons for orientation (Norte/Sur for latitude, Este/Oeste for longitude) and a text input field. Below these is a "Resolución" field. To the right is a sidebar labeled "Opciones" containing four buttons: "Introducir puntos manualmente", "Representación", "Guardar datos", and "Cargar datos".

Imagen 64: Movimiento VSAT.

Como ya se ha comentado anteriormente, se han implementado dos maneras con las que simular el movimiento del terminal VSAT.

En la pantalla que nos muestra la imagen anterior, se puede observar la primera manera de simular el movimiento, que es introduciendo la latitud inicial, latitud final, longitud inicial, longitud final y una resolución de n puntos. De la misma manera que con cualquier otro dato, la aplicación es robusta, y en caso de introducir un dato que no es posible, se abre un cuadro de diálogo informando del error.

Anteriormente, cuando se introducían los datos de la latitud y longitud, se tenía que introducir el valor absoluto (valor positivo), y se seleccionaba la orientación (norte, sur, este u oeste). En este nuevo caso, se puede introducir un número positivo (indica este, en el caso de la longitud; y norte en el caso de la latitud) o un número negativo (oeste, en caso de la longitud; sur en caso de la latitud). Después, se ha de introducir la resolución de puntos, que hace referencia al número de puntos en los que se quieren realizar los cálculos del balance de enlace.

Para poder realizar los cálculos, se han de haber introducido todos los datos necesarios, y se debe pulsar el botón que se puede observar en la imagen anterior.

Cuando se hace click sobre el botón de “Representación”, se abre una nueva ventana que contiene una representación en dos dimensiones del mapamundi, sobre la cual aparecen representados los puntos iniciales y finales que se han introducido anteriormente. En este caso, la trayectoria seguida por el terminal VSAT es una línea recta, que se puede ver representada en el mapa. También se pueden ver los n puntos elegidos como resolución, ya que se subdivide la recta que representa la trayectoria del terminal en esos n puntos.

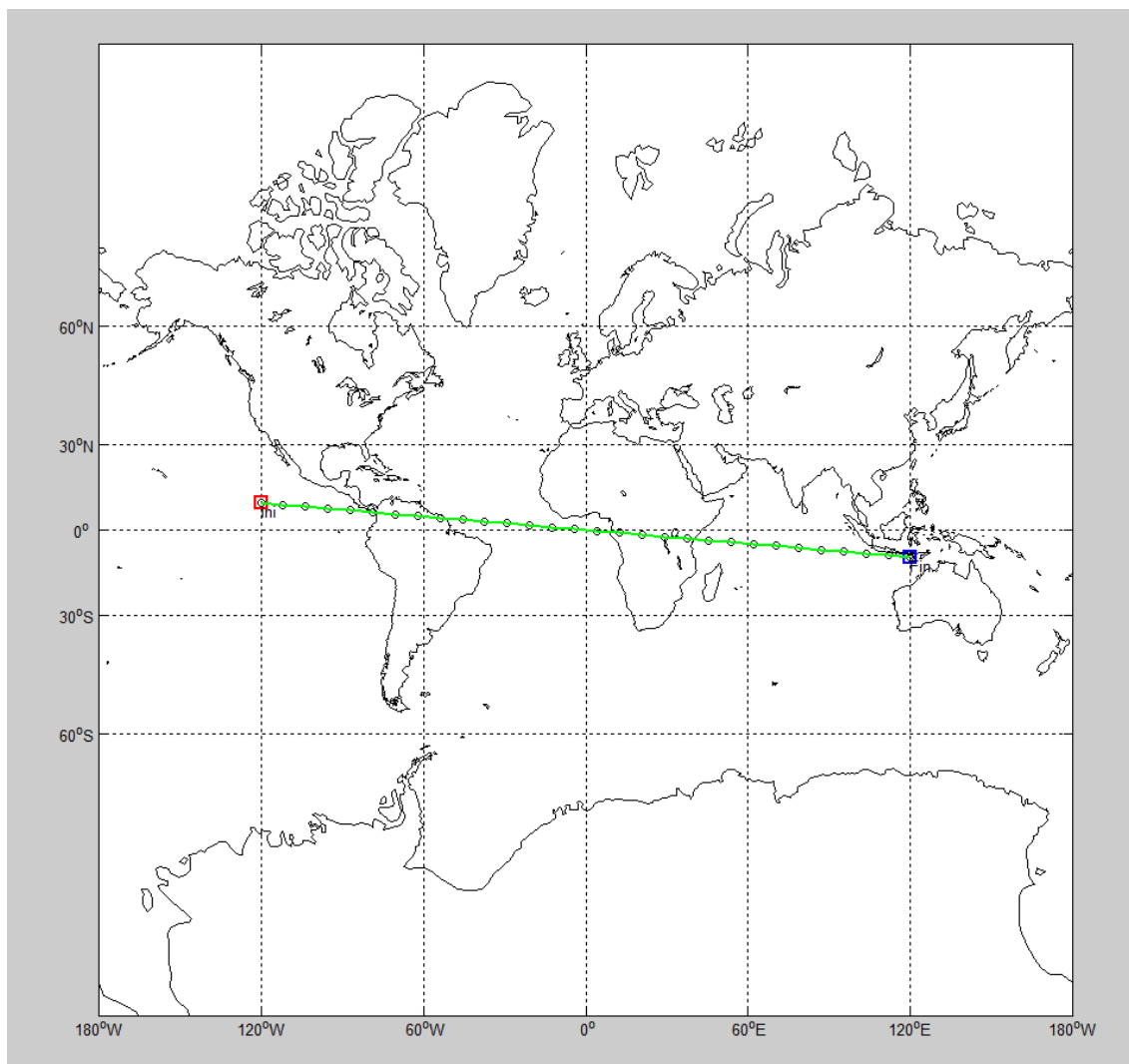


Imagen 65: Representación movimiento.

Posteriormente, se realizan los cálculos y se abre una nueva ventana en la cual se representa en tres dimensiones (y su corte correspondiente en dos dimensiones) la evolución de la relación portadora a ruido para el outbound y para el inbound en función de las latitudes y longitudes introducidas. También, si se han introducido los datos necesarios para calcular la probabilidad de error de bit (BER), se representa la evolución en tres y dos dimensiones. También, se calculan los ángulos de azimut y de elevación y se representan de la misma manera que los anteriores datos.

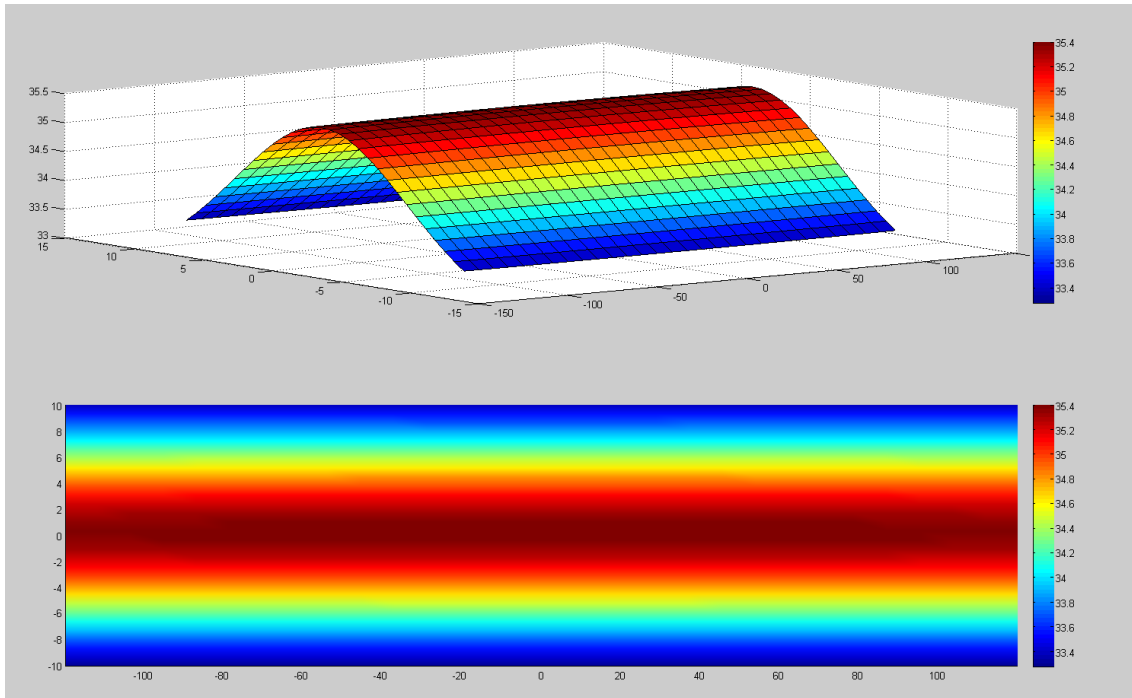


Imagen 66: Cálculos para el *outbound* en función de la posición.

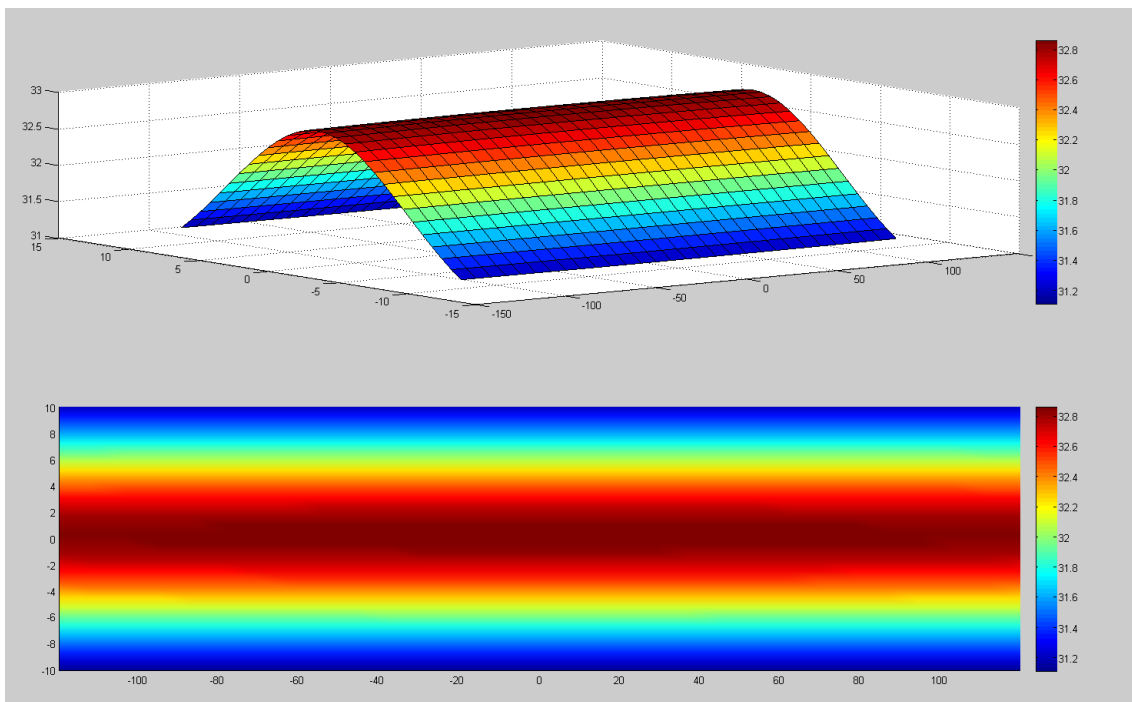


Imagen 67: Cálculos para el *inbound* en función de la posición.

De la misma manera que se ha implementado con los datos del HUB, del satélite y del terminal VSAT, para facilitar la comodidad del usuario, la aplicación permite al usuario guardar los datos de las latitudes y longitudes inicial y final y de la resolución de puntos, de tal forma que en posteriores ejecuciones no tenga que introducir los datos, sino que solamente ha de cargarlos y realizar los cálculos.

Para guardar los datos del movimiento y cargarlos, se ha de hacer click sobre los botones correspondientes que se pueden ver en la Imagen 64. De la misma manera que en el caso de los datos de los terminales, se abre una ventana en la cual se puede explorar y elegir el directorio en el cual se quieren guardar los datos.

Por último existe la segunda opción para simular el movimiento del terminal VSAT. Para acceder a ella, el usuario ha de pulsar el botón de “Introducir datos manualmente”, que se puede ver en la Imagen 64.

Una vez que se pulsa el botón, se abre una nueva ventana en la cual se pueden introducir hasta treinta y cinco latitudes y treinta y cinco longitudes, a elección del usuario. Cada par longitud-latitud representa un punto de la trayectoria que seguirá el terminal VSAT, y en el cual se calculará el balance de enlace para el *outbound* e *inbound*.

[illegible][illegible]

Imagen 68: Introducción puntos manualmente.

De la misma manera que cuando se introduce cualquier tipo de datos, para facilitar la comodidad al usuario y para posteriores ejecuciones, se pueden guardar los puntos introducidos manualmente, de tal forma que posteriormente no haya que volver a introducirlos de manera manual, sino que solamente sea necesario cargarlos.

Una vez que se han introducido los datos, se pueden realizar los cálculos haciendo click sobre el botón “Representación”, que se puede ver en la Imagen 64.

Análogamente a la simulación del movimiento en línea recta, en primer lugar se abre una ventana en la cual está dibujado el mapa del mundo y sobre el cual se representan los puntos que se hayan introducido manualmente. También se representan líneas rectas entre cada punto, de tal forma que el usuario pueda observar la trayectoria que ha seguido el terminal, tal y como se puede ver en la siguiente imagen.

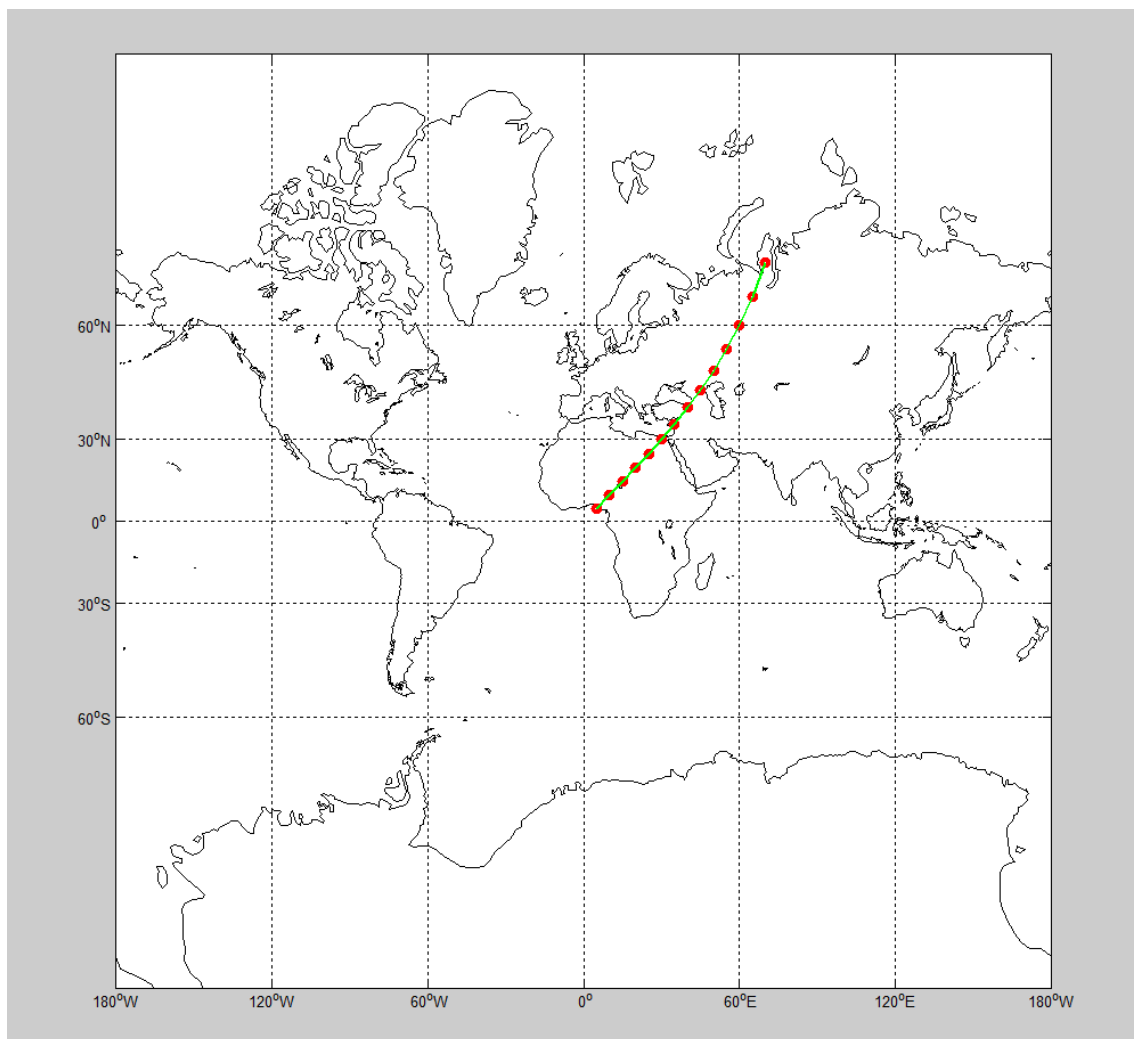


Imagen 69: Representación puntos introducidos manualmente.

Posteriormente, se realizan los cálculos para el enlace *outbound* e *inbound*, y se abren dos nuevas ventanas en las que se representa en tres y en dos dimensiones la evolución de la relación portadora a ruido, en función de las longitudes y latitudes introducidas.

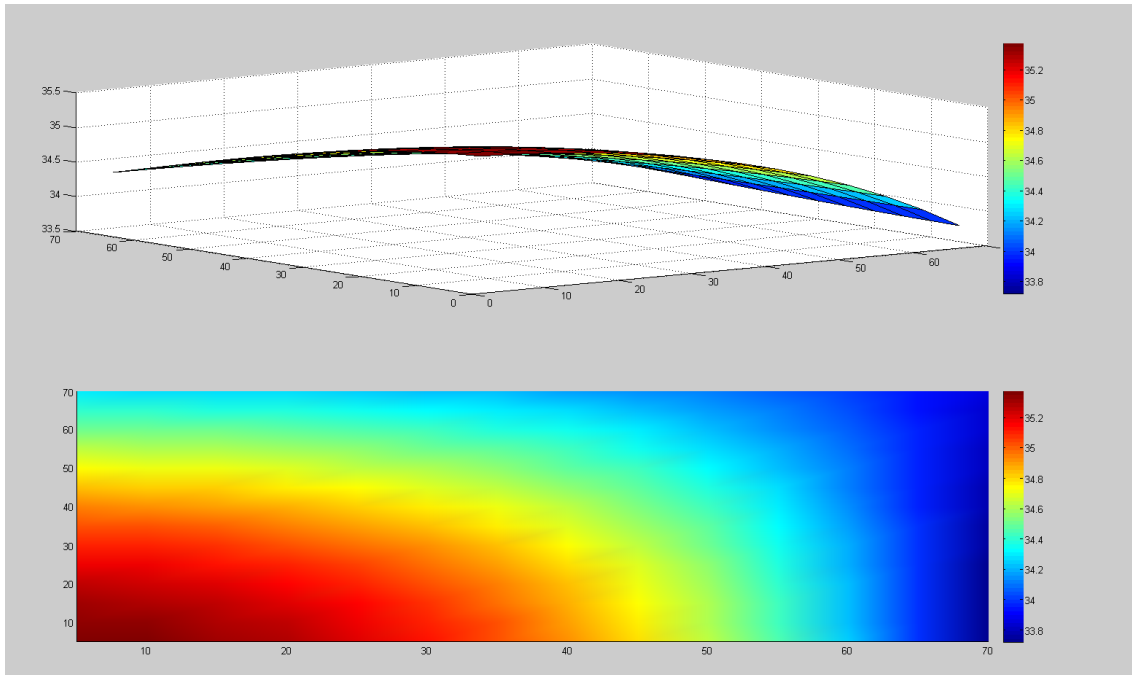


Imagen 70: Cálculos para el *outbound* en función de la posición.

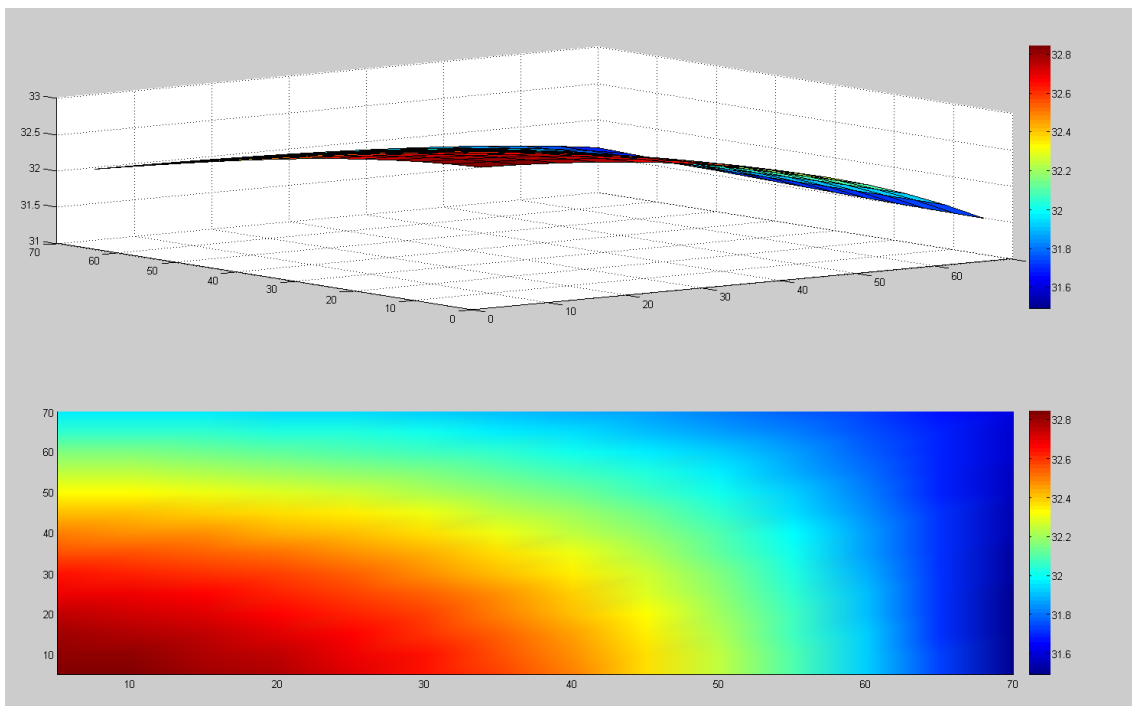


Imagen 71: Cálculos para el *inbound* en función de la posición.

En caso de disponer de los datos necesarios para realizar el cálculo de la probabilidad de error de bit (BER), se realizará el cálculo y también se representará en dos y tres dimensiones en función de la latitud y la longitud introducida. También, se calculan los ángulos de azimut y de elevación y se representan de la misma manera que los anteriores datos.

Anexo 2: Comparación herramientas.

En este anexo se puede ver una tabla que muestra las diferencias y similitudes entre la herramienta que se ha desarrollado en el TFG y el resto de herramientas mencionadas en el apartado “Estado del arte.”

	Herramienta TFG	Excels UPV	Interactive Wireless Network Design Analysis Utilities	RF Toolbox	AirLink	RF Terrain Profiles	Satellite Link Budget Calculators	VSAT Link Budget Calculator
Gratuita	Sí	Sí	Sí	No	Sí	No	Sí	Sí
Modificable	Sí	Sí	No	No	No	No	No	No
Validez de resultados	Se obtienen los resultados esperados	Resultados distintos	No válida	N/A	No válidos	N/A	Se obtienen resultados diferentes	Se obtienen resultados muy similares a los esperados
Flexibilidad	Muy flexible. Libertad en introducción de datos y elección de unidades	Poco flexible, solo intr. datos	N/A	N/A	Poco flexible, solo intr. datos	N/A	Poca flexibilidad, sólo permite introducir los datos. Unidades predefinidas	Poca flexibilidad, sólo permite introducir los datos. Unidades predefinidas
Apartado gráfico	Interfaz gráfica intuitiva, ordenada y sencilla	Aspecto pobre	N/A	N/A	Muy gráfica	N/A	Interfaz fácil de manejar, menos visual que la del TFG	Interfaz fácil de manejar, menos visual que la del TFG

Tabla 11: Comparación herramientas Estado del arte.

Anexo 3: Solución de Sundman al problema de los tres cuerpos.

El problema de los N cuerpos plantea que, dadas N partículas que interactúan entre sí a través de la inversa de la gravedad al cuadrado de Newton y dada una configuración inicial, se pueda obtener la evolución temporal de la posición de cada partícula y su velocidad.

En el caso $N = 2$, cuando se tienen dos partículas, la solución es más fácil de encontrar. El problema reside cuando N es mayor que 2.

El problema en su forma canónica, fue resuelto bajo condiciones generales para $N = 3$ por el matemático-astrónomo Karl Sundman.

El resultado completo fue publicado en francés en el siguiente libro: “*Sundman, K.F., M’emoire sur le problème des trois corps, Acta Math 36 (1913), 105-179*”.

En el siguiente artículo, escrito por Peter Senchyna, se puede encontrar una solución simplista, basada en el conocimiento de variables complejas.

“*Senchyna, Peter. A (Less than Practical) Solution to the N-Body Problem, Math 336 Term Paper: http://www.math.washington.edu/~morrow/336_13/papers/peter.pdf*”

Anexo 4: Solución de Schwarzschild.

La métrica de Schwarzschild es una solución exacta de las ecuaciones de Einstein relativas al campo gravitatorio que describe el campo generado por una estrella o masa esférica.

Esta solución se puede considerar como el logro más importante de la Relatividad General en el campo de la Mecánica Celeste, ya que es una solución que se corresponde con el resultado Newtoniano de la inversa del cuadrado de la fuerza de atracción universal de la teoría gravitacional clásica.

La solución se puede encontrar en la siguiente referencia:

“*Carroll, Sean. Lecture Notes on General Relativity, part 7. The Schwarzschild Solution and Black Holes. (<http://preposterousuniverse.com/grnotes/grnotes-seven.pdf>)*”

Anexo 5: Antena de Cassegrain.

Este tipo de antenas se basa en principios de óptica geométrica. En estos casos, la longitud de onda de la radiación se considera cero y como consecuencia la radiación se comporta como una onda plana, de tal forma que al incidir sobre superficies de pequeña curvatura se refleja y se refracta según las leyes de Snell.

El ejemplo más común es el reflector parabólico alimentado en su foco por una antena de bocina.

Una versión mejorada de esta antena anterior, es la antena basada en el telescopio inventado por Cassegrain.

Este telescopio consta de dos espejos y un instrumento óptico. El espejo primario está situado en la parte posterior y recoge los rayos incidentes, reflejándolos hacia el espejo secundario. El espejo secundario refleja hacia atrás los rayos procedentes del espejo primario, que son recogidos por el instrumento óptico. Si los rayos incidentes son paralelos al eje del telescopio, el haz resultante se concentra en el punto en el que está colocado el instrumento de observación. La ventaja principal de este telescopio es obtener una gran distancia focal de objetivo, con longitud mucho menor a la necesaria en un telescopio clásico.

El objetivo para la antena Cassegrain es sustituir la bocina de alimentación por un segundo reflector, o subreflector excitado con otra bocina, de tal forma que la geometría del sistema sea análoga a la del telescopio de Cassegrain.

La geometría, funcionamiento y ventajas de esta antena se pueden encontrar en la siguiente publicación.

"Gordillo Florencio, Manuel L. Guixa Arderiu, Ramón. Antena Cassegrain. (<http://www.coit.es/foro/pub/ficheros/libros03. antena cassegrain 515320de.pdf>)"



Imagen 72: Antena Cassegrain.

(<http://maam891.files.wordpress.com/2011/05/cass.jpg>)

Anexo 6: Antena gregoriana.

Las antenas de doble reflector como esta y la anterior se basan en los principios que se han utilizado en los telescopios ópticos. Esta, en concreto, se basa en los principios del telescopio gregoriano.

Se utiliza un doble reflector para conseguir estructuras más compactas que permitan que la posición de la bocina de alimentación sea reflejada alrededor los focos del subreflector añadido.

Las diferencias existentes entre la antena gregoriana y la antena Cassegrain residen en:

- **Tamaño:** el reflector de la antena Cassegrain está situado más cerca al reflector principal, haciendo que sea más compacta que la antena gregoriana en la dirección horizontal.

Por otro lado, la alimentación de la antena Cassegrain se coloca más lejos del reflector principal y del subreflector que en el caso de la antena gregoriana, por lo que es menos compacta en la dirección vertical.

- **Desbordamiento:** la alimentación de la antena gregoriana ilumina el subreflector con un ángulo de incidencia mayor que en el caso de la antena Cassegrain, lo que provoca una mayor flexibilidad en la anchura del haz y un mejor control.
- Otra diferencia reside en la topología del reflector secundario. En el caso de la antena Cassegrain, el reflector secundario es convexo, y en el caso de la antena gregoriana el reflector secundario es cóncavo.



Imagen 73: Antena gregoriana.
(<http://www.abcradiotel.com/?p=93>)

Anexo 7: Función Q.

La función Q es una forma de expresar probabilidades para variables aleatorias normales gaussianas. Para $x \in \mathbb{R}$, $Q(x)$ se define como la probabilidad de que una variable aleatoria normal estándar (media cero, varianza unitaria) supere x .

La definición formal de la función Q es la siguiente.

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (72)$$

Los valores que toma la función Q se pueden encontrar en la siguiente tabla.

x	$Q(x)$	x	$Q(x)$	x	$Q(x)$	x	$Q(x)$
0.00	5.00000×10^{-1}	2.05	2.01822×10^{-2}	4.10	2.06575×10^{-5}	6.15	3.87415×10^{-10}
0.05	4.80061×10^{-1}	2.10	1.78644×10^{-2}	4.15	1.66238×10^{-5}	6.20	2.82316×10^{-10}
0.10	4.60172×10^{-1}	2.15	1.57776×10^{-2}	4.20	1.33457×10^{-5}	6.25	2.05226×10^{-10}
0.15	4.40382×10^{-1}	2.20	1.39034×10^{-2}	4.25	1.06885×10^{-5}	6.30	1.48823×10^{-10}
0.20	4.20740×10^{-1}	2.25	1.22245×10^{-2}	4.30	8.53991×10^{-6}	6.35	1.07657×10^{-10}
0.25	4.01294×10^{-1}	2.30	1.07241×10^{-2}	4.35	6.80688×10^{-6}	6.40	7.76885×10^{-11}
0.30	3.82089×10^{-1}	2.35	9.38671×10^{-3}	4.40	5.41254×10^{-6}	6.45	5.59251×10^{-11}
0.35	3.63169×10^{-1}	2.40	8.19754×10^{-3}	4.45	4.29351×10^{-6}	6.50	4.01600×10^{-11}
0.40	3.44578×10^{-1}	2.45	7.14281×10^{-3}	4.50	3.39767×10^{-6}	6.55	2.87685×10^{-11}
0.45	3.26355×10^{-1}	2.50	6.20967×10^{-3}	4.55	2.68230×10^{-6}	6.60	2.05579×10^{-11}
0.50	3.08538×10^{-1}	2.55	5.38615×10^{-3}	4.60	2.11245×10^{-6}	6.65	1.46547×10^{-11}
0.55	2.91160×10^{-1}	2.60	4.66119×10^{-3}	4.65	1.65968×10^{-6}	6.70	1.04210×10^{-11}
0.60	2.74253×10^{-1}	2.65	4.02459×10^{-3}	4.70	1.30081×10^{-6}	6.75	7.39226×10^{-12}
0.65	2.57846×10^{-1}	2.70	3.46697×10^{-3}	4.75	1.01708×10^{-6}	6.80	5.23096×10^{-12}
0.70	2.41964×10^{-1}	2.75	2.97976×10^{-3}	4.80	7.93328×10^{-7}	6.85	3.69250×10^{-12}
0.75	2.26627×10^{-1}	2.80	2.55513×10^{-3}	4.85	6.17307×10^{-7}	6.90	2.60013×10^{-12}
0.80	2.11855×10^{-1}	2.85	2.18596×10^{-3}	4.90	4.79183×10^{-7}	6.95	1.82643×10^{-12}
0.85	1.97663×10^{-1}	2.90	1.86581×10^{-3}	4.95	3.71067×10^{-7}	7.00	1.27981×10^{-12}
0.90	1.84060×10^{-1}	2.95	1.58887×10^{-3}	5.00	2.86652×10^{-7}	7.05	8.94589×10^{-13}
0.95	1.71056×10^{-1}	3.00	1.34990×10^{-3}	5.05	2.20905×10^{-7}	7.10	6.23784×10^{-13}
1.00	1.58655×10^{-1}	3.05	1.14421×10^{-3}	5.10	1.69827×10^{-7}	7.15	4.33890×10^{-13}
1.05	1.46859×10^{-1}	3.10	9.67603×10^{-4}	5.15	1.30243×10^{-7}	7.20	3.01063×10^{-13}
1.10	1.35666×10^{-1}	3.15	8.16352×10^{-4}	5.20	9.96443×10^{-8}	7.25	2.08386×10^{-13}
1.15	1.25072×10^{-1}	3.20	6.87138×10^{-4}	5.25	7.60496×10^{-8}	7.30	1.43884×10^{-13}
1.20	1.15070×10^{-1}	3.25	5.77025×10^{-4}	5.30	5.79013×10^{-8}	7.35	9.91034×10^{-14}
1.25	1.05650×10^{-1}	3.30	4.83424×10^{-4}	5.35	4.39771×10^{-8}	7.40	6.80922×10^{-14}
1.30	9.68005×10^{-2}	3.35	4.04058×10^{-4}	5.40	3.33204×10^{-8}	7.45	4.66701×10^{-14}
1.35	8.85080×10^{-2}	3.40	3.36929×10^{-4}	5.45	2.51849×10^{-8}	7.50	3.19089×10^{-14}
1.40	8.07567×10^{-2}	3.45	2.80293×10^{-4}	5.50	1.89896×10^{-8}	7.55	2.17629×10^{-14}
1.45	7.35293×10^{-2}	3.50	2.32629×10^{-4}	5.55	1.42835×10^{-8}	7.60	1.48065×10^{-14}
1.50	6.68072×10^{-2}	3.55	1.92616×10^{-4}	5.60	1.07176×10^{-8}	7.65	1.00490×10^{-14}
1.55	6.05708×10^{-2}	3.60	1.59109×10^{-4}	5.65	8.02239×10^{-9}	7.70	6.80331×10^{-15}
1.60	5.47993×10^{-2}	3.65	1.31120×10^{-4}	5.70	5.99037×10^{-9}	7.75	4.59463×10^{-15}
1.65	4.94715×10^{-2}	3.70	1.07800×10^{-4}	5.75	4.46217×10^{-9}	7.80	3.09536×10^{-15}
1.70	4.45655×10^{-2}	3.75	8.84173×10^{-5}	5.80	3.31575×10^{-9}	7.85	2.08019×10^{-15}
1.75	4.00592×10^{-2}	3.80	7.23480×10^{-5}	5.85	2.45787×10^{-9}	7.90	1.39452×10^{-15}
1.80	3.59303×10^{-2}	3.85	5.90589×10^{-5}	5.90	1.81751×10^{-9}	7.95	9.32558×10^{-16}
1.85	3.21568×10^{-2}	3.90	4.80963×10^{-5}	5.95	1.34071×10^{-9}	8.00	6.22096×10^{-16}
1.90	2.87166×10^{-2}	3.95	3.90756×10^{-5}	6.00	9.86588×10^{-10}		
1.95	2.55881×10^{-2}	4.00	3.16712×10^{-5}	6.05	7.24229×10^{-10}		
2.00	2.27501×10^{-2}	4.05	2.56088×10^{-5}	6.10	5.30342×10^{-10}		

Tabla 12: Valores función Q.

Anexo 8: Modelo de pérdidas de Friis.

El modelo de Friis se deduce de las ecuaciones de Maxwell y permite calcular la potencia recibida a cierta distancia en condiciones ideales, es decir, sin obstáculos de ninguna naturaleza.

La fórmula para el cálculo de pérdidas utilizando este modelo es la siguiente:

$$L = 32.44 + 20 \log r + 20 \log f \quad (73)$$

Dónde:

- L: Pérdidas por trayectoria en dB.
- f: Frecuencia en MHz.
- r: Distancia en KM

Este modelo de pérdidas y más modelos, se pueden encontrar en el siguiente enlace:

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/soriano_m_jc/capitulo2.pdf

Anexo 9: Función elíptica de Jacobi.

Las funciones elípticas de Jacobi son formas estándares de las funciones elípticas. Hay tres funciones de Jacobi, y se denotan como $\text{cn}(u,k)$, $\text{dn}(u,k)$ y $\text{sn}(u,k)$, de donde k es el módulo de la elipse. Deben su nombre al matemático alemán Carl Gustav Jakob Jacobi.

Estas funciones surgen de la integral elíptica de primera especie, definida de la siguiente forma:

$$u = F(\phi, k) = \int_0^\phi \frac{dt}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 t}} \quad (74)$$

Donde $0 < k^2 < 1$.

El resto del estudio de la función elíptica de Jacobi se puede encontrar en el siguiente enlace:

<http://mathworld.wolfram.com/JacobiEllipticFunctions.html>

Bibliografía

- [1] "Digital Mantenimientos, La historia de los satélites de telecomunicaciones.
<http://www.digitalmantenimientos.com/servicios/antenas-parabolicas/la-historia-de-los-satelites-de-telecomunicaciones/>"
- [2] "Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicaciones, Historia de los satélites de comunicaciones, julio-agosto 2002.
http://www.coit.es/foro/pub/ficheros/historia_de_los_satelites_de_comunicaciones_bit_134_5c6c417a.pdf"
- [3] "Enciclopedia Jurídica, Telecomunicaciones por satélite, 2014 <http://www.enciclopedia-juridica.biz14.com/d/telecomunicaciones-por-satelite/telecomunicaciones-por-satelite.htm>"
- [4] "Boletín Oficial del Estado, Ley 37/1995, de 12 de diciembre, de Telecomunicaciones por Satélite, 1995. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-1995-26837"
- [5] "Boletín Oficial del Estado, Ley 9/2014, de 9 de mayo, de Telecomunicaciones, 2014.
<http://www.boe.es/boe/dias/2014/05/10/pdfs/BOE-A-2014-4950.pdf>"
- [6] "Ramos, Francisco: Cálculo de radioenlaces. <http://www.radioenlaces.es/articulos/calculo-de-radioenlaces/>"
- [7] "AMSAT Argentina: Tracking y Seguimiento de Satélites, 2004.
<http://www.amsat.org.ar/SOFTWARE/>"
- [8] "Clarke, Arthur C. 1968: 2001. Una odisea en el espacio"
- [9] "Echeto, Gerardo & Suárez, Leonardo: Protocolo IEC-104/VSAT aplicado al seguimiento y control de subestaciones eléctricas. Telematique, Volumen 8 – Número 2, año 2009.
<http://www.publicaciones.urbe.edu/index.php/telematique/article/view/873/2158>"
- [10] "Universidad Politécnica de Madrid: Comunicaciones por satélite.
<http://ocw.upm.es/teoria-de-la-senal-y-comunicaciones-1/radiocomunicacion/contenidos/presentaciones/satelites-07.pdf>"
- [11] "Calvo, Miguel & Martínez, Ramón: Subsistemas del satélite. Plataformas. Comunicaciones por satélite, curso 2008-09. <http://www.gr.ssr.upm.es/docencia/grado/csat/material/CSA08-3-Subsistemas.pdf>"
- [12] "Gil Jiménez, Víctor Pedro: Tema 5, Sistemas de Radiocomunicación por satélite. GTT Sistemas de Telecomunicación 2013/2014"
- [13] "Las Telecomunicaciones Satelitales:
http://satelites.site90.net/Comunicaciones_satelitales/transpondedores.html"
- [14] "Cooperativa de Telecomunicaciones Oruro Ltda, 2012.
<http://www.coteor.net.bo/images/13040101.jpg>"

- [15] "Braeunig, Robert A. *Rocket & Space Technology: Orbital Mechanics*, 2013.
<http://www.braeunig.us/space/orbmech.htm>"
- [16] "Wikipedia, la enciclopedia libre: Órbita, 2014. <http://es.wikipedia.org/wiki/%C3%93rbita>"
- [17] "Kelso, T.S: *Basics of the Geostationary Orbit*, May 2014
<http://celestrak.com/columns/v04n07/>"
- [18] "Vázquez Valenzuela, Rafael. *Mecánica Orbital / Astronauta y Vehículos Espaciales*. 1 de octubre de 2013. <http://www.aero.us.es/astro/files1314/t2.pdf>"
- [19] "Universidad Politécnica de Valencia:
http://www.upv.es/satelite/trabajos/Grupo9_99.00/mara151.gif"
- [20] "Escuela, Leonardo: *Satélites y comunicaciones*, mayo 2010.
<http://satelitesycomunicaciones.blogspot.com.es/2010/05/angulo-de-elevacion.html>"
- [21] "Sáenz Peña, Roque: *Teoría de las comunicaciones*. Departamento de Ciencia y Tecnología Universidad Nacional de Quilmes. <http://www.urbe.edu/info-consultas/web-profesor/12697883/articulos/Comunicaciones%20Satelites%20y%20Celulares/Teoria%20de%20las%20Telecomunicaciones.pdf>"
- [22] "Recine, Alexandra: *TDMA. Acceso múltiple por División del Tiempo*, octubre 2013
http://prezi.com/a5rfin3ic_o7/tdma-acceso-multiple-por-division-del-tiempo/"
- [23] "Talavera, Juan S: *FDMA TDMA*, junio 2011. <http://es.slideshare.net/jsilver29/fdma-tdma>"
- [24] "Grupo de Comunicaciones Ópticas, Universidad de Valladolid.
http://nemesi.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema4/imagenes_tema4_2/image001.jpg"
- [25] "Coimbra, Edison: *Multiplexación TDM*, febrero 2011.
<http://es.slideshare.net/edisoncoimbra/44-multiplexacion-tdm-7031366>"
- [26] "Wikitel: *Multiplexación en el tiempo*.
http://wikitel.info/wiki/Multiplexaci%C3%B3n_en_el_tiempo"
- [27] "Daza, Rafael; Jacome, Jonathan; Meza, Andrés. *Communications-1*.
<http://communicationsone.files.wordpress.com/2011/01/11.jpg>"
- [28] "Rouse, Margaret: *Frequency-division multiplexing (FDM)*, April 2005.
<http://searchnetworking.techtarget.com/definition/frequency-division-multiplexing>"
- [29] "Everett, John: *VSATs. Very small aperture terminals*, IEE Telecommunications Series 28, 1996"
- [30] "Stoddard, R: *Bullish on VSATs, Satellite Communications*, June 1988, pp. 27-31"
- [31] "Taylor, S: *From here to eternity: VSAT applications made to last*, Via Satellite, Aug. 1988, pp. 22-23"

Bibliografía

[32] *"Morgan, W.L and Rouffet, D: Business earth stations for telecommunications, in 'Transponder Usages' (John Wiley and Sons, 1988) chap 14 Sect 14.4 ISBN 0 471 63556-1"*

[33] *"McGovern, D: The economics of microterminal services in Europe. Satellite Communications '88 Proceedings, London, Dec. 1988"*

[34] *"Towards a dynamic European Community. Green Paper 'The development of the Common Market for telecommunication services and equipment'. COM(87) 290 final, Brussels"*